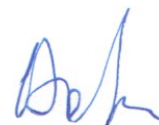


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель - д.ф.-м.н., профессор  
**Светухин Вячеслав Викторович**

Ульяновск - 2021

# Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Глава 1. Анализ преобразователей и систем для автоматизированного радиационного контроля и управления, методов численного и математического моделирования</b> . . . .	<b>14</b>
1.1. Преобразователи и системы для регистрации радиационного излучения. Функция управления исполнительными механизмами и сигнализацией в автоматизированных системах радиационного контроля . . . . .	14
1.2. Преобразователи и системы радиационного контроля и управления на основе оптических волокон . . . . .	26
1.3. Методы решения задач радиационного переноса излучения . . . .	45
Выводы . . . . .	52
<b>Глава 2. Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения активности радиационных источников бета-излучения</b> . . . . .	<b>54</b>
2.1. Первичный оптико-волоконный преобразователь для регистрации бета-излучения как элемент системы автоматизированного радиационного контроля и управления . . . . .	54
2.2. Численная модель первичного оптико-волоконного преобразователя для регистрации бета-излучения . . . . .	56
2.3. Разработка программного обеспечения для реализации численной модели первичного оптико-волоконного преобразователя для регистрации бета-излучения . . . . .	63

2.4. Экспериментальные исследования образца оптико-волоконного преобразователя для регистрации бета-излучения с использованием радиационных источников на базе изотопов $^{63}\text{Ni}$ , $^{89}\text{Sr}$ и $^{90}\text{Sr}$ . . .	68
Выводы . . . . .	75

<b>Глава 3. Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма-излучения . . . . .</b>	<b>77</b>
---	-----------

3.1. Первичный оптико-волоконный преобразователь для определения мощности дозы гамма-излучения как элемент системы автоматизированного радиационного контроля и управления . . .	77
3.2. Численная модель первичного оптико-волоконного преобразователя для детектирования гамма-излучения . . . . .	79
3.3. Разработка программного обеспечения для реализации численной модели первичного оптико-волоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного гамма-излучения . . .	85
3.4. Экспериментальные исследования образца предложенного оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма-излучения . . . . .	92
Выводы . . . . .	98

<b>Глава 4. Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для определения положения точечного радиационного источника бета-излучения . . . . .</b>	<b>101</b>
--	------------

4.1. Первичный оптико-волоконный преобразователь для определения пространственного положения точечного радиационного источника как элемент системы автоматизированного радиационного контроля и управления . . . . .	101
--	-----

4.2. Математическое моделирование первичного оптико-волоконного преобразователя для определения пространственного положения точечного радиационного источника . . . . .	104
4.3. Экспериментальные исследования макета предложенного оптико-волоконного преобразователя с помощью имитации точечного радиационного источника . . . . .	107
Выводы . . . . .	110
<b>Глава 5. Разработка многоканальной системы радиационного контроля и управления с использованием новых первичных оптико-волоконных преобразователей в качестве элементов системы . . . . .</b>	<b>112</b>
5.1. Разработка многоканальной оптико-волоконной системы автоматизированного радиационного контроля и управления . .	112
5.2. Разработка программного обеспечения оптико-волоконной системы автоматизированного радиационного контроля и управления . . . . .	115
5.3. Разработка экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и управления на основе первичных оптико-волоконных преобразователей . . . . .	125
Выводы . . . . .	131
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>132</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>Приложение А. Акт внедрения результатов диссертационной работы . . . . .</b>	<b>159</b>



## Введение

### **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’Keeffe 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  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  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 Самарский 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 мощно-



сти 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 страниц текста, включая 51 рисунок. Библиографический список включает 225 пунктов на 25 страницах.

## Глава 1

# **Анализ преобразователей и систем для автоматизированного радиационного контроля и управления, методов численного и математического моделирования**

### **1.1. Преобразователи и системы для регистрации радиационного излучения. Функция управления исполнительными механизмами и сигнализацией в автоматизированных системах радиационного контроля**

Принцип действия любого преобразователя (датчика), предназначенного для детектирования радиационных излучений, основывается на определенном физическом, химическом или эффекте другого вида, который определяет изменение характеристик встроенного в преобразователь сенсорного элемента. Количественная величина данного изменения подлежит измерению и служит мерой воздействия радиационного излучения на сенсорный элемент [223]. Различные типы датчиков обладают своими преимуществами и недостатками, выбор датчика определяется условиями практически решаемой задачи. Например, для медицинских приложений важным требованием к дозиметрическому датчику является его тканеэквивалентность. Для мониторинга протяженных радиационных объектов - возможность проведения удаленных измерений и мультиплексирования и.т.д. [188].

Традиционно наиболее широкое применение находят измерительные приборы на ионизационных камер, сцинтилляционных датчиков и фотоэмульсий

[219]. Выделяют интегрирующие, сцинтилляционные и полупроводниковые дозиметры. К интегрирующим относят термолюминесцентные и радиофотолюминесцентные дозиметры, дозиметры, основанные на эффектах термостимулированной электронной эмиссии и деградации люминесценции, окрашивании стекол и пластиков, а также трековые дозиметры. Термолюминесценция - люминесценция, возникающая при нагревании вещества, предварительно возбуждённого светом или жёстким излучением. В основе термолюминесцентного метода лежит измерение интенсивности световыхода в процессе нагревания термолюминесцентного вещества. При этом измерения проводят в динамике в зависимости либо от времени нагревания, либо от температуры [56]. Измерение термолюминесценции однажды облучённого дозиметра может быть осуществлено только однократно, так как после измерения термолюминесценция гасится. Указанный факт объясняется тем, что после нагревания кристалл возвращается в первоначальное состояние, и часть освобождающейся энергии излучается в виде свечения термолюминесценции[223].

Наибольшее распространение получили термолюминесцентные дозиметры на основе LiF и CaF<sub>2</sub>, так как они относятся к самым чувствительным дозиметрам, дозиметрическая характеристика их линейна в диапазоне 1 мрад -10000 рад соответственно. Спад показаний во времени почти отсутствует [183].

Недостаточно разработаны термолюминесцентные методы регистрации низкоэнергетического рентгеновского и  $\gamma$ -излучения ( $E < 40$  кэВ), тяжёлых заряженных частиц (протонов,  $\alpha$ -частиц), электронов с энергией 1 МэВ, а также быстрых нейтронов (эффективность регистрации люминофором в водородсодержащей оболочке на два-три порядка ниже, чем для  $\gamma$ -излучения). Это создаёт значительные трудности для термолюминесцентной дозиметрии нейтронов при наличии  $\gamma$ -фона.

Термолюминесцентные кристаллы или стекла широко используются в качестве пальчиковых дозиметров для определения высоких локальных доз излучения [219]. В особо ответственных местах термолюминесцентные дозиметры

применяются как вспомогательные из-за их особенности только однократного измерения дозиметрической информации с последующим возвращением кристалла в первоначальное состояние [219].

Радиофотолуминесцентные детекторы излучения состоят в основном из активированных серебром фосфатных стекол с добавкой Ba, K, Li, Mg и B в различных пропорциях. Оптимальное содержание активирующего серебра - около 4% [219]. После облучения таких стекол наблюдается радиофотолуминесценция (РФЛ), вызываемая ионизирующим излучением, и возбуждённая светом люминесценция.

Стеклянные РФЛ-дозиметры охватывают широкий диапазон доз от 50 мрад до 105 рад, что позволяет использовать их как при повседневном контроле, так и при аварийной дозиметрии. «Ход с жесткостью» стекол, так же как и у некоторых фотопленочных дозиметров, исправляется экранированием фильтрами, снижающими интенсивность низкоэнергетического  $\gamma$ -излучения [219, 223].

Радиофотолуминесцентные детекторы широко используются и хорошо оправдали себя в дозиметрической практике благодаря надежности показаний и возможности любого числа повторных измерений, не снимающих предыдущих показаний [223].

Твердые тела под влиянием предварительного возбуждения способны к излучению с поверхности электронов с энергией в несколько электронвольт. Это явление называют возбуждённой электронной эмиссией [223]. Вызвать его может, например, механическое воздействие, свет или ионизирующее излучение.

Дозиметры на основе термостимулированной электронной эмиссии не уступают в чувствительности другим твердотельным дозиметрам [98]. Однако регистрация стимулированных электронов по аппаратному оформлению более сложна и громоздка, чем при других методах, поэтому этот способ не находит широкого применения.

Снижение люминесцентной способности органических соединений (деградация люминесценции) под влиянием ионизирующего излучения лежит в основе одного из методов люминесцентной дозиметрии [219].

Облучение способных к люминесценции веществ снижает люминесценцию. Это снижение может служить мерой поглощённой дозы [195].

Деградация люминесценции органических веществ, в отличие от других рассмотренных выше способов, используется как простой метод измерения высоких и сверхвысоких доз излучения в интенсивных радиационных полях, возникающих при работе ускорителей, ядерных реакторов и установок для облучения. Правда, деградация не следует линейному закону, но зато дозиметры на ее основе дешевы, просты в изготовлении и эксплуатации. Следует отметить и другие преимущества этого типа дозиметров: показания дозиметра снимаются быстро и простым способом; показания можно снимать повторно; отсутствует насыщение деградации люминесценции [183].

Дозиметры, основанные на окрашивании стёкол и пластиков, применяются в основном для детектирования больших доз радиации. Ограничением является использование стекол с применением специальных добавок, стабилизирующих окраску. Изменение окраски определяется спектрофотометрически путём сравнения облучённого и не облучённого стеклянного дозиметра. Во многих случаях изменение окраски пропорционально дозе излучения [219].

К преимуществам этого метода можно добавить: простота процесса измерения и возможность повторных измерений; возможность предварительной оценки значения дозы; независимость показаний от мощности дозы в широком диапазоне; устойчивость стекла к воздействиям внешней среды; небольшие размеры дозиметра. Также, в последнее время распространение получают радиохромные пленки и гели, меняющие свою прозрачность под действием ионизирующего излучения, например, радиохромная пленка медицинского назначения Gafchromic EBТ3, на базе которых появляются оригинальные конструкции дозиметров [142, 221, 193, 212, 215, 216, 157].

Широко известным типом дозиметра нейтронов является твердотельный трековый детектор нейтронов. В таких дозиметрах все чаще используется пластик (например, такой как полиаллил дигликоль карбонат (РАДС)) нанесенный на полипропиленовую основу. Хотя, треки нейтронов обнаруживаются во многих неорганических кристаллах, стеклах и пластиках [219].

Для определения дозы облучения треки протравливаются в виде видимых углублений специальными химическими реагентами и затем путём подсчёта этих углублений в микроскоп определяется доза [183].

Трековые детекторы нейтронов позволяют проводить измерения поглощенной дозы нейтронного излучения в широком интервале значений, при этом они не проявляют чувствительности к другим видам ионизирующих излучений.

В основе сцинтилляционных детекторов - известный физический эффект генерации оптических фотонов сцинтилляционным веществом под воздействием радиационного излучения. Вспышки света испускаемые сцинтиллятором регистрируются с помощью фотоэлектронного умножителя, что позволяет определить дозу, поглощенную его веществом [219, 223].

Различают следующие виды сцинтилляторов: органические кристаллы, неорганические кристаллы и органические полимеры [187, 33, 15, 47, 109, 174, 218, 163]. При этом неорганические и органические сцинтилляторы имеют принципиально разный механизм люминесценции. В то время как люминесценция неорганических сцинтилляторов связана с определённой кристаллической решёткой, люминесценция органических веществ объясняется внутримолекулярными процессами. Поэтому органические сцинтилляторы могут использоваться не только в кристаллическом состоянии, но и в виде жидких и твёрдых растворов.

Механизм свечения большинства неорганических кристаллических сцинтилляторов можно объяснить, используя зонную энергетическую модель [223]. Предполагают, что образующиеся в кристалле при облучении свободные электроны, дырки и экситоны отдают свою энергию активаторным центрам и тем

самым приводят их в возбуждённое состояние. Переход из этого состояния в нормальный сопровождается генерацией оптических фотонов.

К сцинтилляторам для дозиметрии предъявляются следующие основные требования [183]:

- оптическая прозрачность сцинтиллятора в диапазоне длин волн, соответствующих собственному спектру люминесценции;
- высокая сцинтилляционная эффективность и пропорциональный отклик сцинтиллятора в широком диапазоне мощностей доз;
- согласованность спектра люминесценции и спектра чувствительности фотоэлектронного умножителя;
- независимость выхода люминесценции от температуры в пределах  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ;
- достаточная радиационная стойкость сцинтиллятора.

Основной проблемой при использовании сцинтилляционных дозиметров для измерения мощности дозы или экспозиционной дозы рентгеновского или  $\gamma$ -излучений является ход с жёсткостью сцинтиллятора, т. е. зависимость показаний дозиметра от энергетического спектра падающего излучения [76, 86, 89, 88, 94, 144, 97]. Ход с жёсткостью определяется химическим составом вещества сцинтилляционного детектора.

Для устранения указанного недостатка используют комбинированные сцинтилляторы. Для получения комбинированных сцинтилляторов с малым ходом с жёсткостью имеются следующие способы [195]:

- комбинация органического сцинтиллятора с неорганическим;
- механическое смешение двух мелкокристаллических органических люминесцирующих веществ с различными эффективными атомными номерами;

- растворение люминесцирующего органического вещества в основном растворителе с добавлением подходящего второго растворителя;
- включение веществ с высоким эффективным атомным номером в полимерный сцинтиллятор.

Их преимуществом по отношению к другим твердотельным дозиметрам является то, что они позволяют проводить моментальные измерения в быстро меняющемся радиационном поле, например при бетатронном облучении. Большое преимущество имеет также малый объем детектора, что особенно полезно при использовании в медицине [159, 206] и в полях неравномерного облучения [183].

Применение полупроводников основано на получении р-п-переходов в объеме полупроводника или в поверхностно-барьерном слое. Образовавшиеся при облучении полупроводника с запирающим слоем электронно-дырочные пары разделяются сильным электрическим полем в слое объемного заряда и р-п-перехода, возникающем при наложении внешнего запирающего напряжения [219].

Возможно и другое применение полупроводникового детектора с запирающим слоем и без подачи предварительного напряжения смещения, когда используется р-п-фотоэффект. В этом случае мерой мощности дозы или экспозиционной дозы является возникающее напряжение или ток короткого замыкания в полупроводнике. Для измерения дозы ионизирующего излучения так же можно использовать вызванные необратимые изменения в атомной структуре полупроводникового детектора, что изменяет электрические свойства последнего, под действием облучения [180]

Для изготовления детекторов с запирающим слоем чаще всего используют кремний. Кристаллы кремния с р-п-переходом удовлетворяют главным требованиям: ток, возникающий в полупроводнике из-за тепловой проводимости, мал по сравнению с ионизационным током, а время жизни носителей зарядов велико по сравнению с временем собирания [44, 183]



Изменение электропроводности некоторых твёрдых тел под влиянием ионизирующего излучения открыло новые возможности для дозиметрии. Такого типа кристаллические дозиметры нельзя отнести к классу твердотельных ионизационных камер, так как происходящие в них внутренние процессы могут вызывать возрастание силы тока на 3-4 порядка. В качестве рабочего тела дозиметра пока исследован только CdS. Кристаллы CdS приобретают электропроводность не только при облучении светом, но и при облучении рентгеновскими лучами и заряженными частицами [219].

Явление изменения электрического сопротивления под воздействием света или ионизирующего излучения называют фотопроводимостью (другое название - фотосопротивление). По чувствительности кристаллы CdS близки к фотоумножителям. Применяются преимущественно монокристаллы и спёкшиеся агломераты [185, 175].

К преимуществам дозиметров на основе CdS относят: очень малые размеры и простота устройства; высокая чувствительность. Недостатками являются большой ход с жёсткостью и значительная инертность показаний прибора при изменении интенсивности возбуждения.

С применением рассмотренных выше дозиметрических датчиков возможна разработка автоматизированных систем радиационного контроля и управления. При этом, для обеспечения безопасности на предприятиях атомной отрасли помимо обычного мониторинга радиационной обстановки необходимо обеспечить эффективное управление исполнительными механизмами и сигнальными устройствами на основании полученной информации с дозиметрических датчиков. В качестве исполнительных механизмов могут выступать различные механизмы загрузки, выгрузки, транспортировки радиационных источников, запорные механизмы, механизмы, обеспечивающие защиту персонала при возникновении аварийной ситуации на предприятии. Сигнальные устройства выполняют функцию оповещения персонала о превышении допустимых уровней радиационного излучения в установленных контрольных точках и необходимости совер-

шения определенных регламентных мероприятий. На рисунке 1.1 представлена примерная архитектура такой автоматизированной системы радиационного контроля.

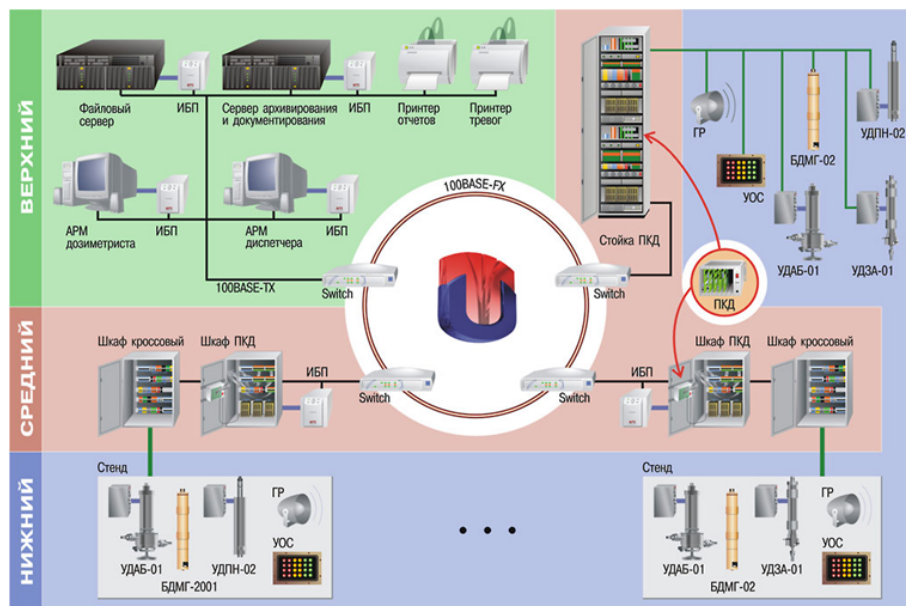


Рисунок 1.1 - Архитектура автоматизированной системы радиационного контроля (АСРК)[204]

Показанная система имеет распределенную структуру и состоит из элементов, распределенных по трем уровням: самый нижний - детекторы и устройства сигнализации; на среднем уровне осуществляется сбор, обработка информации и управление; на самом верхнем уровне выполняется исключительно обработка и визуализация мониторинговой информации.

Средний уровень составляют программируемые дозиметрические контроллеры, которые выполняют функции:

- сбора данных с дозиметрических датчиков;
- сравнения полученных значений в контрольных точках с заданными пороговыми значениями;
- управления устройствами оповещения и сигнализации, исполнительными механизмами;

- передачи полученных данных на вышестоящий уровень;
- аппаратной диагностики всех элементов комплекса.

На верхнем уровне располагаются специальные рабочие станции, с помощью которых пользователям предоставляется программный интерфейс к измерительной информации, логу событий, возможно ручное управление элементам системы в интерактивном режиме.

В целом такая АСРК, установленная на предприятии атомной отрасли ГХК "Маяк реализует следующие функции:

- распределенный радиационный контроль на предприятии;
- детектирование различных видов радиационных излучений;
- управление системами оповещения, запорными механизмами;
- автоматическое тестирование работоспособности всех элементов комплекса;
- отображение измерительной информации пользователю.

К недостаткам решения можно отнести необходимость чрезмерного развития второго уровня системы, состоящего из множества контроллеров, снижающих отказоустойчивость системы, но данный недостаток обусловлен в первую очередь выбором типа дозиметрических датчиков.

На рисунке 1.2 представлена архитектура системы радиационного контроля и управления с развитым механизмом оповещения на основе микроконтроллера с использованием беспроводных технологий [17].

В центре системы мобильная микроконтроллерная станция с подключенным счетчиком Гейгера-Мюллера, которая находится в обследуемой области по

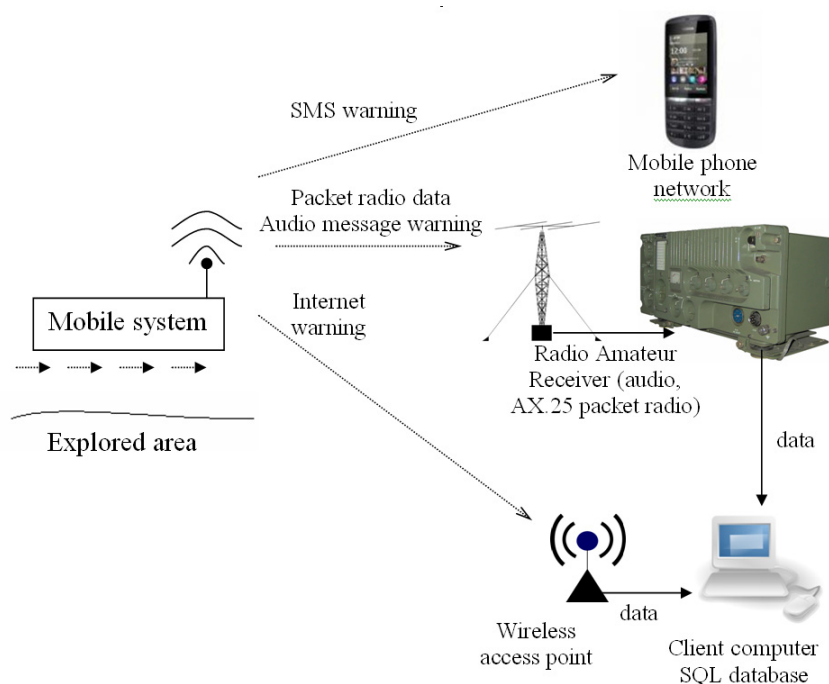


Рисунок 1.2

Рисунок 1.3 - Схематическое представление архитектуры системы радиационного мониторинга и оповещения на основе микроконтроллерной системы [17]

радиационным воздействием. С мобильной станции измерительная информация передается на сервер базы данных через дальнедействующие коротковолновые радиоловительские каналы с использованием протокола передачи данных AX.25 - низкоскоростной реализации протокола TCP/IP для организации коммуникаций на таких расстояниях, а также через сеть Internet при наличии доступной точки подключения беспроводной связи WiFi. Также, при превышении допустимых порогов по уровням радиационного излучения мобильная станция генерирует тестовые и аудио оповещения, которые передаются на сервер аналогичным образом, а также посредством мобильной связи. Такая система успешно использовалась для обнаружения радиационных выбросов в атмосфере в результате аварии на атомной станции в Фукусиме (Япония). Очевидным слабым местом предлагаемой системы является организация канала связи.

Автоматизированная система радиационного контроля и управления большего масштаба реализована в ЦЕРН (Европейская организация по ядерным исследованиям) на проекте Большой адронный коллайдер (рисунок 1.4)[160, 132].

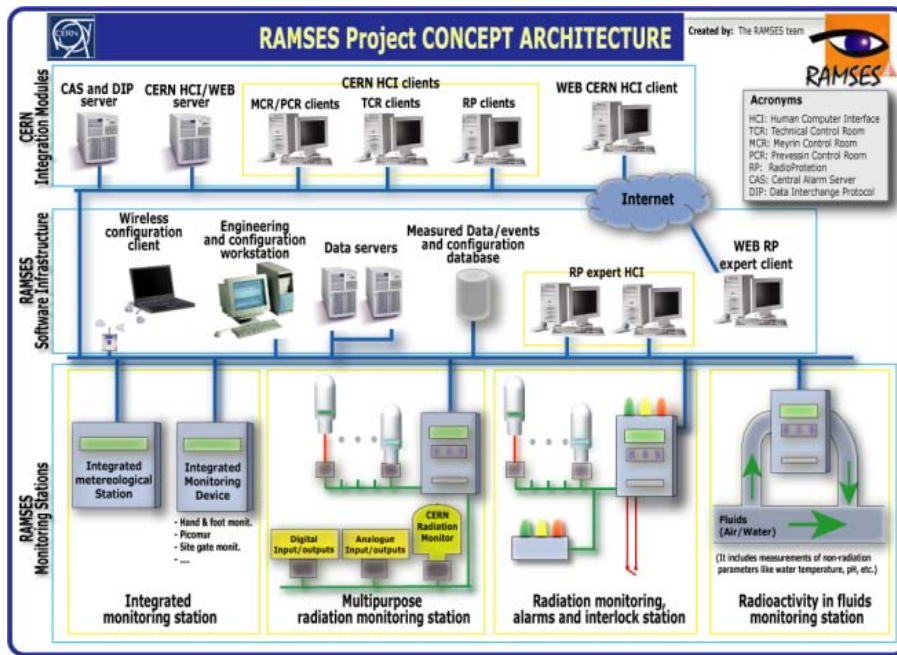


Рисунок 1.4 - Архитектура автоматизированной системы радиационного контроля и управления RAMSES, Большой адронный коллайдер (CERN) [160, 132]

Система спроектирована для контроля значений амбивалентных эквивалентных мощностей доз и амбивалентных эквивалентных доз под землей и на поверхности земли внутри и снаружи периметра территории ЦЕРН и имеет трехуровневую структуру. На нижнем уровне находятся 112 мониторинговых станций 9 различных типов, собирающих информацию с 358 датчиков 18 различных типов. Мониторинговые станции оборудованы устройствами сигнализации, подключены к системе доступа и управляются с рабочих станций второго уровня, на котором также аккумулируются полученные данные, конфигурации станций и датчиков, история сигналов о превышении пороговых значений. На третьем уровне реализуется программный интерфейс для интеграции системы радиационного контроля и управления с другими системами ЦЕРН, в частности, с центральной комнатой управления. Локальным и внешним клиентам сети ЦЕРН предоставляется доступ к мониторинговой информации и интерфейс управления аварийной и технической сигнализацией, системой доступа и запорными устройствами.

При испытательном запуске системы были обнаружены и решены следующие проблемы, связанные с применением ионизационных камер в качестве дозиметрических датчиков:

- для регистрации переменных радиационных полей были разработаны электронные устройства счета электрических импульсов для ионизационных камер, чувствительных к токам в диапазоне от  $10^{-14}$  А до  $10^{-5}$  А;
- для предотвращения деградации полупроводниковых устройств счета электрических импульсов, применяемых совместно с ионизационными камерами, указанные устройства должны размещаться вне зоны радиационного воздействия, в связи с этим применялись специальные соединительные кабели, позволяющие регистрировать токи порядка 0,1 пА на расстоянии до 800 м до ионизационной камеры;
- применялись специальные решения для улучшения электромагнитной помехозащищенности дозиметрических датчиков (ионизационных камер) с целью уменьшения влияния внешних шумов.

В связи с этим, крайне перспективным в таких системах видится использование волоконных дозиметрических преобразователей, что позволит избежать вышеперечисленных проблем, обусловленных в большей мере передаче измерительной информации в виде электрических сигналов. Кроме того, использование оптических линий передачи позволяет располагать измерительные блоки (мониторинговые станции) на расстоянии, значительно превышающем 800 м.

## **1.2. Преобразователи и системы радиационного контроля и управления на основе оптических волокон**

В условиях возрастающей потребности в обеспечении надежного функционирования измерительного оборудования в различных сферах, в особенности

- в сфере ядерной энергетики, актуальной задачей является поиск альтернативных технологий построения сенсорных систем и систем передачи данных. Перспективным направлением в этой связи является использование волоконно-оптических преобразователей и систем [189].

Использование оптических волокон в качестве волоконно-оптических преобразователей имеет много преимуществ по сравнению с обычными сенсорами, такими, например, как электрохимический и полупроводниковый сенсоры. Оптические волокна выполнены из диэлектрического материала и, как таковые, химически инертны. Это делает их весьма удобными в химическом зондирования или в химически агрессивных средах. Они также устойчивы к электромагнитным помехам, а их высокая электрическая изоляция делает их пригодными для использования в молниезащите, а также в приложении к высоким напряжениям и медицине. Оптические волокна также способны выдерживать высокие температуры - до 40-60 °С. Эти характеристики позволяют использовать волоконно-оптические сенсоры в средах, в которых не допускается применение электрических датчиков. Благодаря использованию оптических волокон возможно находиться на большом расстоянии от точки измерения, что позволяет вести дистанционное зондирование в неблагоприятных условиях окружающей среды, например, в районах с высоким уровнем радиации в непосредственной близости от атомного реактора. Волоконно-оптические сенсоры, как было также показано, обладают высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном, а также высоким разрешением [140].

Волоконно-оптические сенсоры условно делятся на: внутренние датчики, где взаимодействие происходит в пределах самого оптического волокна и внешние датчики, где оптические волокна используются, чтобы направлять свет на и от области, где свет взаимодействует с измеряемым параметром. Рисунок 1.5 обобщает классификацию оптоволоконных сенсоров радиационного излучения. Датчики на затухающих волнах работают, заставляя вводимый в волновод свет

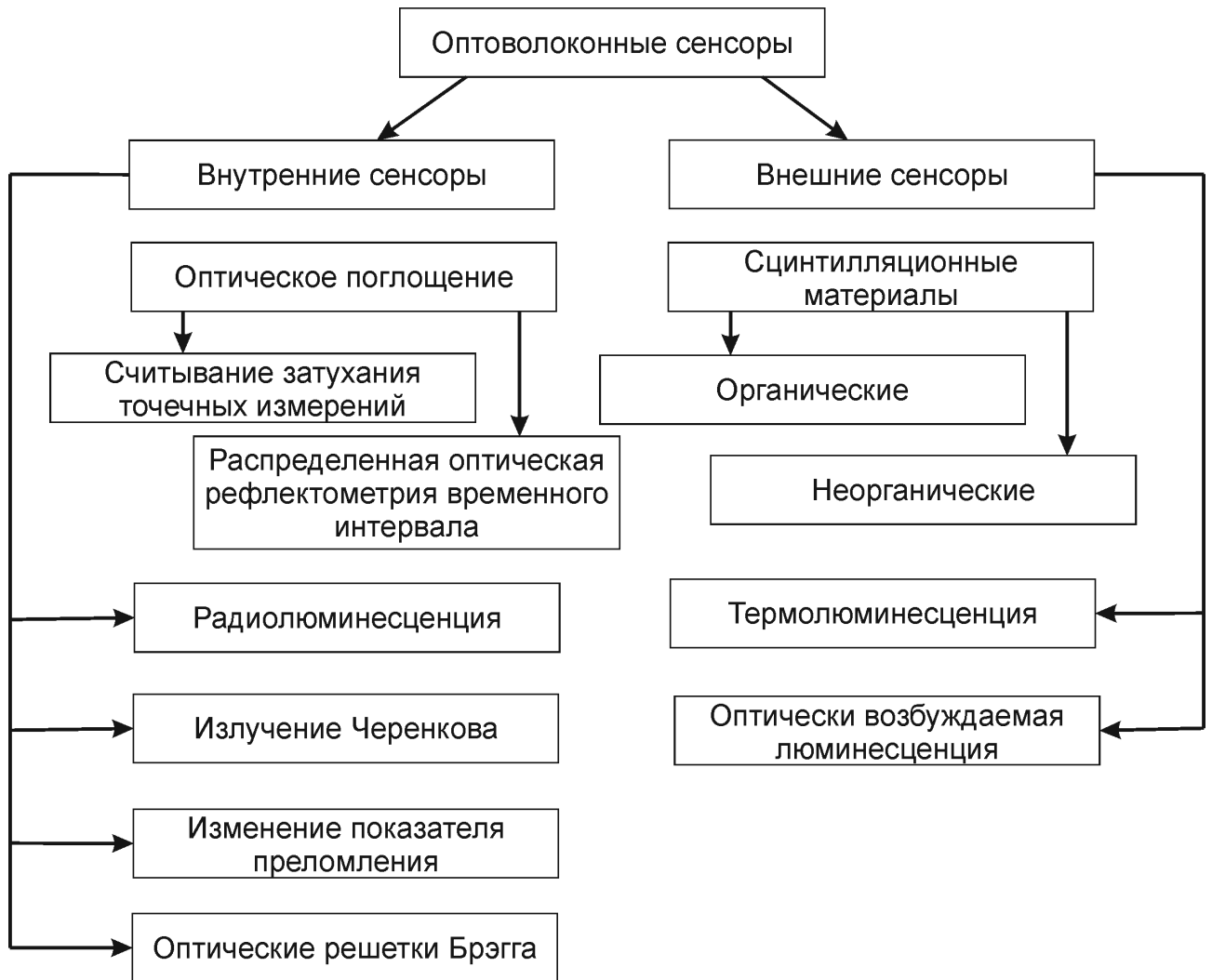


Рисунок 1.5 - Классификация оптоволоконных волоконных преобразователей для детектирования радиационного излучения в соответствии с принципом действия

взаимодействовать с измеряемой величиной с помощью затухающего поля и обладают чертами и внутренних, и внешних устройств.

Возможно также дополнительно классифицировать волоконно-оптические сенсоры в соответствии с используемым типом модуляции [101]:

- сенсоры амплитуды или интенсивности детектируют количество света, которое является функцией воздействия окружающей среды. Их способность использовать как некогерентные, так и когерентные источники света наряду с простыми оптическими компонентами дает в целом дешевую систему.
- фазовые или интерферометрические сенсоры детектируют модуляцию в фазе, вызванную измеряемой величиной. Этот тип источника требует источ-



ников когерентного света, что делает систему на их основе относительно дорогостоящей. Тем не менее, они могут обеспечить очень высокий уровень чувствительности.

- поляриметрические сенсоры детектируют модуляцию в поляризации света, вносимую измеряемой переменной.
- спектроскопические сенсоры детектируют модуляцию в спектре оптического излучения, вызванную воздействующей переменной.

При выборе волоконно-оптического сенсора для измерения характеристик радиационных источников (активность, мощность дозы, положение источника) должно быть учтено несколько параметров [140]:

- чувствительность. Чувствительность волоконного преобразователя должна соответствовать требованиям конкретного приложения.
- линейность. Зависимость выходного сигнала сенсора как функции измеряемого параметра. Некоторым приложениям необходима хорошая линейность (без насыщения сигнала) на протяжении нескольких порядков.
- остаточный сигнал. Необходимо, чтобы выходной сигнал после его считывания (для случая многократных сенсоров, например, на основе термолюминесценции или оптически возбуждаемой люминесценции) был как можно меньше; недопустим кумулятивный сигнал, возрастающий от облучения к облучению, либо, по крайней мере, этот несчитываемый сигнал должен быть воспроизводимым.
- снижение чувствительности преобразователя в результате воздействия ионизирующего излучения. Снижение чувствительности должно быть минимальным и прогнозируемым.

- послесвечение или фосфоресценция. В случае сенсоров на основе радиационно-возбуждаемой люминесценции на его временное разрешение может оказывать влияние «хвост» сигнала люминесценции.
- временная зависимость или время отклика. Время отклика должно удовлетворять требованиям приложения.
- стабильность и надежность. Радиационная устойчивость и устойчивость к другим воздействиям, которые проявляются, например, в электромагнитно-неблагоприятных средах;
- простота интеграции. Скорость развертывания и низкая стоимость системы являются важными параметрами.

В радиационном поле, в кварцевых оптических волокнах могут наблюдаться следующие явления: поглощение энергии радиационных частиц в волокне, сцинтилляционный эффект, изменение характера рассеяния оптического сигнала, термолюминесценция, изменение показателя преломления волновода. Радиационно-возбуждаемое поглощение и радиационно-возбуждаемая люминесценция - эффекты, которые способствуют деградации отношения сигнал-шум сигнала (затухание сигнала), передаваемого по оптической направляющей волокна. Однако, исследованы возможности использования этих эффектов для измерения параметров радиационного излучения.

На радиационно-возбуждаемое поглощение оказывают влияние:

- условия производства, параметры, связанные с технологией, используемой в производстве оптического волокна: условия осаждения, характеристики процесса вытягивания - скорость вытягивания, натяжение волокна при вытягивании, температура осаждения преформы, отношение кислород-реагент ( $O_2/R$ ) используемое во время осаждения сердцевины и оболочки [55, 164, 71];

- наличие каких-либо прекурсоров до облучения [112];
- легирующие примеси, присутствующие в оптической сердцевине волокна или оболочке (чистый кварц, либо легированный Се, Ер, Ge, F, N, Р, Yb, высокой/низкой концентрацией ОН, высокой/низкой концентрацией Cl, H<sub>2</sub>-заполнение), [134, 11, 84], [14, 16, 55, 61, 60, 128, 58, 72, 95, 59, 104, 133, 102, 21, 135], в некоторых ситуациях такие ингредиенты вносят вклад в радиационное упрочнение [130, 16, 131];
- остаточные вещества, оставшиеся после производственного процесса, такие, например, как хлор, имеющие соответствующий центр окраски в УФ-области спектра, которая может простираться в видимый диапазон [128, 67];
- вид излучения, которому подвергается оптическое волокно [134, 14, 127, 42, 61, 60, 164, 128, 110, 121, 45];
- условия облучения: полная доза, мощность дозы, стационарное, импульсное, циклическое [134, 11, 84, 93, 59, 133, 161, 135];
- эффект отжига и температурное напряжение, приложенные к оптическому волокну во время или после облучения [158, 161, 121, 31];
- оптический спектральный диапазон, рассматриваемый при оценке РВП [102];
- покрытие оптического волокна [127, 41];
- процесс фотообесцвечивания и уровень оптической мощности вводимой в оптическое волокно для измерений, а также соответствующая длина волны [134, 112, 161, 165].

Сложность изменений, вызванных высоко-энергическим излучением в оптическом пропускании кварцевых оптических волокон определяется конструкцией оптического волокна, т.е. легирующими примесями сердцевины/оболочки и отношением диаметров [82, 55, 61, 60, 93, 133], а также множеством центров окраски активируемых под действием облучения, таких как [16, 124]:

- Ge-центры: GeE, Ge(1), Ge(2), GeC, GeX, Ge-NBOH (вакансия кислорода без связей) [54, 14, 164, 128, 59, 135];
- P-центры: P1, P2, P4, Phosphorus-Oxygen-Hole - POHC [14, 164, 48, 133, 135];
- парамагнитные центры, связанные с кварцем (вакансия кислорода без связей - NBOHC, перекись-радикал, SiE, вакансия с самозахватом) или диамагнитные центры (центр с недостатком кислорода; перекислая связь [84, 128]).

Для того чтобы различить вклад различных центров окраски в поглощение кварцевых оптических волокон, индуцированное облучением, были проведены дополнительные исследования помимо измерений оптического пропускания: электронного парамагнитного резонанса [128, 129, 154, 170], люминесценции [103, 164, 154, 112], термолюминесценции [29, 162, 104, 1, 45], люминесценции конфокальной микроскопии и анализа комбинационного рассеяния [128, 124], время-разрешенная фотолюминесценция [19]. На основании результатов, полученных из различных источников, возможно разложение спектров оптического поглощения с помощью гауссовых полос, связанных с известными центрами окраски [128, 48, 154].

Эффект генерации излучения Вавилова-Черенкова заряженных частиц, возникающий в оптических волокнах находящихся под облучением, также может быть использован для разработки волоконных преобразователей [152].

Распространяясь в диэлектрике, прозрачной среде, заряженная частица (то есть электрон), обладая скоростью больше, чем фазовая скорость оптического излучения в этой среде, взаимодействует с молекулами-посредниками, поляризуя их. Так как молекулы очень быстро возвращаются к своему основному состоянию, излучается оптическое излучение [22]. Оптическое излучение имеет непрерывное распределение в УФ и видимом спектральном диапазоне.

Поскольку испускаемый спектр излучения изменяется как  $1/\lambda^3$ , спектр излучения Вавилова-Черенкова находится преимущественно в УФ и синем диапазоне. Исследования по генерации излучения Вавилова-Черенкова были проведены как для кварцевых, так и для пластиковых оптических волокон, таких как полиметилметакрилат - ПММА [83, 106]. Эффективность привязки и детектирования излучения Вавилова-Черенкова с помощью оптического волокна является функцией типа оптического волокна (его показателя преломления), энергии частиц, геометрии облучения: угла падения пучка частиц на оптическую ось волокна; апертуры оптического волокна, расстояния между траекторией частицы и осью оптического волокна [6, 106, 108].

В случае волокна ПММА с  $n = 1,49$  и энергии электронного пучка 6 МэВ максимальным значением для  $\Theta$  является  $47,7^\circ$  [106], в то время как для кварцевого оптического волокна ( $n = 1,46$ ) и энергии электронного пучка 175 кэВ угол излучения Вавилова-Черенкова оценивался в  $46^\circ$  [83].

Гамма-излучение может привести к генерации излучения Вавилова-Черенкова, только если мишень преобразователя Комптона помещается между гамма-источником и оптическим волокном. Фотоны, падающие на конвертер, генерируют электроны посредством эффекта Комптона, электроны в дальнейшем используются для генерации излучения Вавилова-Черенкова. Эффективность преобразования из гамма-излучения в оптическое излучение зависит от [62]: материала мишени (показано, что лучшим является бериллий), его толщины, геометрической схемы расположения оптического волокна и мишени, типа оптического волокна, энергетического спектра падающего гамма-излучения (ис-

следования проводились с источником  $^{60}\text{Co}$  - линиями 1,17 и 1,33 МэВ, и источником  $^{24}\text{Na}$  с его 1,38 и 2,76 МэВ линиями).

В литературе исследовано поведение волоконных брэгговских решеток (ВБР), изготовленных в кварцевых оптических волокнах, наблюдаемое при облучении, учитывая, что некоторые авторы предлагают использовать такие решетки в детекторах излучения [92, 178, 203, 113]. Использовались различные виды волоконных брэгговских решеток, что имеет отношение к оптоволоконным материалам, и технологии изготовления: легированные Ge с и без заполнения  $\text{H}_2$  или  $\text{D}_2$  [40, 155] и колегированные В/Ge фоточувствительные волокна [51], оптические волокна с низким содержанием Р и легированные N [30], решетки, изготовленные классическими УФ-методами или с помощью фемтосекундного УФ лазерного излучения [69]. С целью повышения иммунитета к радиационным эффектам было выполнено предварительное облучение образца гамма-лучами либо ультрафиолетовым излучением перед облучением в ядерном реакторе [116, 155]. Решетки Брэгга были исследованы как в пропускании, так и в отражении, искомыми параметрами были: сдвиг длины волны пика в спектре решетки, коэффициенты пропускания/отражения устройства, полуширина, чувствительность устройства к температуре. Исследования показали, что покрытие волоконных брэгговских решеток может играть важную роль в радиационной чувствительности датчика [155]. Как правило, при гамма-облучении параметр полуширины пика не зависел от облучения, в то время как сдвиг длины волны был заметен, будучи зависимым как от полной дозы облучения, так и мощности дозы - сдвиг длины волны направлен как в сторону больших [24, 38, 51], так и меньших длин волн [51], сопровождаясь эффектом насыщения и снижением коэффициента отражения устройства. В зависимости от процесса изготовления и состава оптического волокна, сильно легированные Ge оптические волокна оказались менее чувствительны к гамма-облучению, в то время как оптические волокна с водородным заполнением показывают более высокую чувствительность [75, 40]. В некоторых

ситуациях, при смешанном гамма-нейтронном облучении, полуширина линии волоконных брэгговских решеток также увеличивалась, что свидетельствует о частичном стирании сформированной решетки [116]. Температурный коэффициент волоконных брэгговских решеток не зависит от гамма-облучения [75]. Волоконные преобразователи на основе брэгговских решеток применимы для измерения доз более 2 кГр (легированные водородом. Ge-волокна) [141, 92]. Однако, такие преобразователи и системы требуют специальных условий для установки и стабильного температурного режима, не позволяют проводить измерения в реальном времени, имеют высокий порог чувствительности, кроме того необходимо рефлектометрическое оборудование для анализа спектрометрических характеристик является дорогостоящим, а сам анализ требует довольно развитых методов.

Дополнительные эффекты, производимые в кварцевых оптических волокнах при облучении:

- изменение плотности кварца, которое наблюдалось как во время испытаний гамма-облучения распределенных оптоволоконных датчиков с использованием эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), где зафиксирован нелинейный рост измеренной частоты и полуширины линии Мандельштама-Бриллюэна с ростом полной дозы [43], так и при облучении мягким рентгеновским или реакторным излучением [85];
- модификация показателя преломления кварца, подвергнутого гамма-облучению [49].

Широкого применения данные эффекты относительно к волоконным преобразователям они не нашли.

Оптические материалы, как таковые либо включенные в оптические волокна, демонстрируют радиолуминесценцию: видимое излучение испускается тех пор, пока материалы подвергаются ионизирующей радиации. Этот сигнал, как правило, накладывается на спектр излучения Вавилова-Черенкова, но его

можно отличить по узким полосам спектра излучения. Наблюдаемые радиолюминесцентные пики как функция изучаемого материала, легирующих примесей и типа облучения расположены в диапазоне от УФ - 185 нм, 250 нм, 285 нм до видимого - 420 нм, 450 нм, 696 нм [156, 165, 173]. Суперпозиция двух спектров осложняет дискриминацию сигнала люминесценции, поэтому было разработано несколько методов для улучшения отношения сигнал/шум для обнаружения сигнала радиолюминесценции на фоне излучения Вавилова-Черенкова: для обнаружения возбужденной радиолюминесценции используется стробируемое обнаружение люминесценции [46, 122], различные временные интервалы или различное угловое распределение этих двух сигналов [148]; метод вычитания с использованием фиктивного оптического волокна для отдельной регистрации излучения Вавилова-Черенкова; оптический фильтр или установка на основе спектрометра [4, 107, 108].

Альтернативой генерации радиолюминесценции в оптических материалах является использование коммерчески доступных сцинтилляционных оптических волокон, например, изготавливаемых Saint-Gobain Crystals and Detectors (Франция [32]), Kuraray Co. (Япония) или специально разработанных - таких как оптических волокон, легированных Се ([20]).

Волоконные преобразователи сцинтилляционного типа, которые способны преобразовывать энергию радиационного излучения в свет получили широкое распространение. Важными свойствами этих сенсоров являются возможность передачи возбужденного светового потока по волокну и его сдвиг по длине волны.

Внутреннее устройство однооболочечного сцинтилляционного волокна показано на рисунке 1.6 [32], в центре конструкции сцинтиллирующая сердцевина из полистирола, окруженная оптической оболочкой. Для внешнего экранирования применяется дополнительный слой поглотителя. В материале сцинтиллирующей сердцевины присутствуют центры люминесценции на основе легирующих добавок, которые и определяют оптический спектр свечения при воздействии



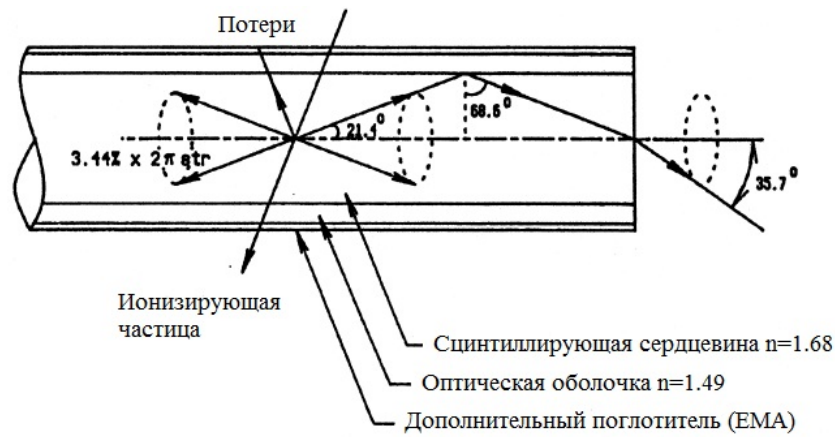


Рисунок 1.6 - Схема сцинтиллирующего волокна. Обозначены углы полного внутреннего отражения

на волокно радиационного излучения. В зависимости от особенностей конструкции удастся улучшить те или иные характеристики волокна, актуальные относительно решаемой задачи. Например, уменьшение диаметра сцинтилляционной сердцевинки приводит к увеличению концентрации центров люминесценции, что повышает световыход, но приводит к нарастанию эффекта затухания в волокне. Важнейшая характеристика модели сцинтилляционного волокна - сцинтилляционная эффективность, равная количеству оптических фотонов, приходящихся на 1 МэВ поглощенной волокном энергии радиационного излучения. Тем выше значение данного параметра, тем эффективнее конструкция модели сцинтилляционного волокна. При этом необходимо учесть, что далее по волокну передается лишь совсем небольшая часть из общего числа сгенерированных в процессе люминесценции оптических фотонов.

Многооболочечные волокна обладают большей эффективностью по сравнению с однослойными, так как включение в конструкцию дополнительных оболочек позволяет увеличить процент захвата сгенерированных оптических фотонов за счет их полного внутреннего отражения на дополнительных границах между оболочками. Многослойная оболочка увеличивает уровень выходного сигнала до 60% дополнительно по сравнению с обычными однослойными волокнами.

Определяющими факторами, оказывающими влияние на величину сцинтилляционной эффективности волокна являются: значения показателей преломления сцинтилляционной сердцевины и оболочки, диаметр волокна. В волокнах круглого сечения эффективность захвата оптических фотонов варьируется по направлению от центра волокна к оболочке в сторону увеличения в диапазоне 3,5-7 %, в волокнах квадратного сечения это значение неизменно - порядка 4 %.

На базе сцинтилляционных волокон разрабатываются позиционно-чувствительные системы, одна из схем построения которых приведена на рисунке 1.7 [119]. В основе схемы - детектор, состоящий из одинаковых по длине сцинтилляционных волокон, состыкованных через линию задержки - транспортное волокно, имеющее близкий по значению показатель преломления. Участок детектора, на котором происходит взаимодействие с падающей радиационной частицей определяется на основе измерения разности временных промежутков, за которые противоположно направленные оптические фотоны, образовавшиеся в процессе радиолуминесценции в сцинтилляционном волокне, проходят расстояния до фотоприемных устройств. Для этого применяются два независимых идентичных измерительных канала с использованием блоков предусилителей и блоков дискриминации. Схема компаратора состоит из временно-амплитудного конвертера, аналого-цифрового преобразователя и амплитудного анализатора. К недостаткам описанной схемы относится сложность аппаратной реализации измерительного метода, для измерения довольно малых временных разностей требуется нетривиальная схема из целого набора электронных компонентов, частично продублированных, и тщательная калибровка. Также в конструкции присутствуют множественные оптические соединения, которые увеличивают потери и вносят добавочную погрешность в результаты измерений.

На рисунке 1.8 [138] показан дозиметрический преобразователь с использованием в качестве сенсорного элемента сцинтилляционного волокна, соединенного с фотодетектором посредством транспортного волокна. Уровень оптического сигнала, полученного в результате радиолуминесценции в волокне,

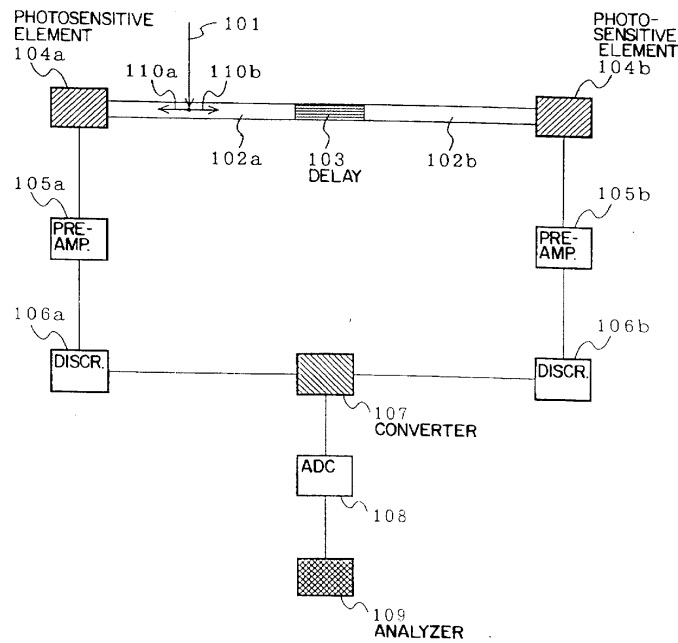


Рисунок 1.7 - Позиционно-чувствительный детектор на базе сцинтилляционных волокон[119]

пропорционален величине воздействия радиационного излучения на сенсорный элемент. Выход фотодетектора соединен через предварительный усилитель с входом цепи оповещения о превышении контрольных уровней. Для создания нескольких каналов измерения в описанном дозиметрическом преобразователе предлагается использовать несколько независимых фотодетекторов со своими системами обработки сигналов, что усложняет конструкцию и повышает ее стоимость.

В настоящее время активно разрабатываются варианты конструкций волоконных преобразователей на основе комбинаций оптических волокон и сцинтилляторов. В таких конструкциях оптическое волокно выполняет роль транспортного канала для передачи полезного оптического сигнала, сформированного в веществе сцинтиллятора под действием радиационного излучения, к фотоприемнику.

Так как особенности метода были рассмотрены в предыдущем разделе, далее подробнее опишем только физический механизм люминесценции для органических сцинтилляторов на примере молекулы антрацена. Этот процесс существенно отличается от процесса люминесценции кристаллических неоргани-

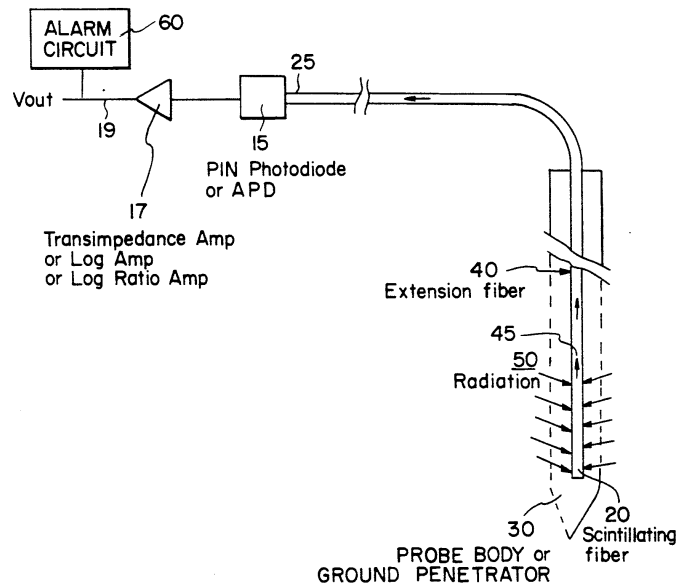


Рисунок 1.8 - Дозиметрический преобразователь с использованием в качестве сенсорного элемента скintилляционного волокна [138]

ческих скintилляторов, которые имеют регулярную кристаллическую решетку. При этом большинство органических скintилляторов на основе органических молекул, обладающих некоторыми свойствами симметрии образуют так называемую  $\pi$ -электронную структуру.  $\pi$ -электронные энергетические уровни такой молекулы изображены на рисунке 1.9.

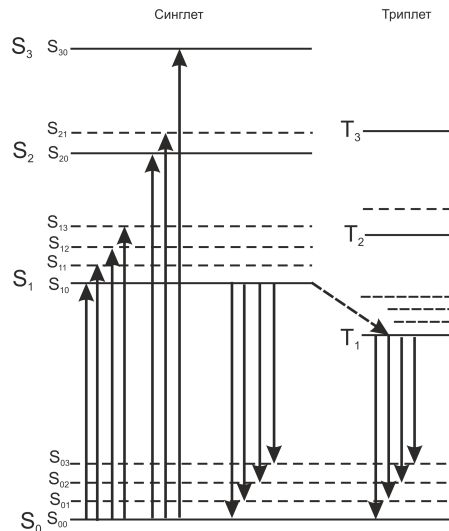


Рисунок 1.9 - Энергетический спектр молекул органического скintиллятора [90]

При поглощении энергия молекула может возбуждаться и переходить в любое возбужденное состояние в этой электронной конфигурации [90]. Серия

синглетных состояний помечены как  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_1$ . Подобный набор триплетных электронных уровней также показан на рисунке 1.9 и обозначен как  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ .

Для рассматриваемой молекулы органического сцинтиллятора, энергетический интервал между  $S_0$  и  $S_1$  составляет 3 или 4 эВ, в то время как интервал между вышележащими состояниями обычно несколько меньше. Каждая из этих электронных конфигураций в свою очередь содержит ряд уровней с большими или меньшими интервалами, которые соответствуют различным колебательным состояниям молекулы. Типичный интервал между этими уровнями порядка 0,15 эВ. Второй индекс в обозначении этих уровней добавлен для того, чтобы различать эти колебательные состояния, и символ  $S_{00}$  представляет собой самый низкий колебательный уровень основного электронного состояния.

Поскольку расстояние между колебательными состояниями велико по сравнению со средней тепловой энергии (0,025 эВ), почти все молекулы при комнатной температуре находятся в состоянии  $S_{00}$ . На рисунке 1.9 поглощение энергии молекулы изображается стрелками, указывающими вверх. В случае сцинтиллятора, эти процессы представляют поглощение кинетической энергии заряженной частицы, передающей энергию молекуле.

Электроны из более высоких синглетных электронных состояний, которые возбуждаются достаточно быстро (порядка пикосекунд) релаксируют на электронное состояние  $S_1$  через механизм безызлучательной рекомбинации. Кроме того, любое колебательное состояние с избыточной энергией (таких, как  $S_{11}$  или  $S_{12}$ ) не находятся в состоянии теплового равновесия со своими соседями и также быстро теряют избыточную энергию.

Таким образом, процесс релаксации в простой органической молекуле за сравнительно короткий период времени переводит все электроны в состоянии  $S_{10}$ .

Основной сцинтилляционный свет (или быстрая флуоресценция) испускается при переходах между состоянием  $S_{10}$  и один из колебательных состояний основного электронного состояния. Эти переходы обозначены вниз стрелками

на рисунке 1.9 [90].

Как было отмечено ранее, пластмассовые сцинтилляторы, используемые в датчиках, состоят из как правило из двойных и тройных люминесцирующих компонентов. На рисунке 1.10 приведен механизм люминесценции в этом случае.

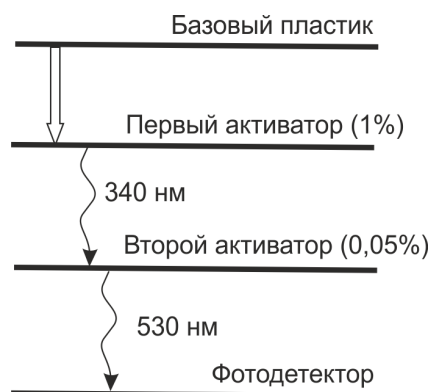


Рисунок 1.10 - Механизм люминесценции в органическом сцинтилляторе

Часто необходимо добавлять вторую фракцию люминофора на уровне нескольких долей процента, а иногда третью, чтобы сместить спектр излучения в более длинноволновую область чтобы лучше соответствовать максимальной чувствительности фотодатчиков. Данный принцип применяется также в спектросмещающих волокнах для достижения той же цели и может быть реализован в конкретных конструкциях волоконных преобразователей.

Таким образом, системы автоматизированного радиационного контроля и управления на базе специальных (сцинтилляционных и спектросмещающих волокон) при совместном использовании со сцинтилляторами являются наиболее перспективными с точки зрения разработки новых волоконных преобразователей.

В рамках конкретных задач волоконные преобразователи на базе специальных волокон для контроля параметров радиационных источников могут иметь следующие преимущества:

- а) гибкость сенсора [26, 141];

- б) энергетическое разрешение [8, 26, 141];
- в) линейный характер отклика [8];
- г) воспроизводимость измерений;
- д) независимость показаний от величины мощности дозы [25];
- е) возможность проведения измерения в реальном времени;
- ж) ткане- и водо-эквивалентность материала детектора [25, 136, 9, 10];
- з) температурная стабильность показаний [171];
- и) не требуют электрического питания; [9, 10, 26, 141];
- к) электромагнитная помехозащищенность [26, 141];
- л) возможность удаленного мониторинга и мультиплексирования [26, 141];
- м) радиационная стойкость [8];
- н) малый чувствительный объем элемента [25];

Данные преимущества могут быть востребованы в следующих приложениях:

- а) измерение поглощенной дозы в радиотерапии [36, 25, 46] и брахитерапии [52];
- б) пространственное распределение дозы в случае линейных электронных и протонных ускорителей для нужд медицины [145, 106, 35];
- в) оценка потерь в пучке (мощность дозы, полная доза, местоположение) в ускорителях частиц [53, 83, 172], профилирования пучка [172] и рабочих условий в накопителе электронов [27, 7];
- г) диагностика профиля пучка радиации синхротрона [18];

- д) нейтронная или смешанная гамма/нейтронная дозиметрия [137, 37];
- е) исследование изотопного состава космических лучей [146];
- ж) радиационная дозиметрия в компьютерной томографии [87, 114];
- з) распределенная радиационная дозиметрия для бета- и гамма-лучей и нейтронов [126];
- и) профиль пучка в случае лазеров на свободных электронах [68] или протонных пучков [123];
- к) радиационный мониторинг почвы и грунтовой воды [139];
- л) системы радиационного контроля и управления на ядерных реакторах [105];
- м) радиационный мониторинг сухих хранилищ ядерного топлива [118];
- н) отслеживание треков заряженных частиц [2, 74, 73, 115, 143, 3];
- о) использование в качестве детекторов переходов для дозиметрических калибровок [81];
- п) космическая дозиметрия [3];
- р) обнаружение трития [50].

Несмотря на достаточно обширные поиски в области разработки волоконных преобразователей в литературных источниках не приводится примеров архитектур волоконных мониторинговых систем, обладающих свойствами многоканальности, универсальности, модульности и расширяемости с использованием в качестве элементов первичных преобразователей на основе специальных волокон и предназначенных для измерения различных параметров радиационных источников, таких как активность, мощность дозы, положение источника.



### 1.3. Методы решения задач радиационного переноса излучения

Проблематика обусловленная решением задач, связанных с радиационным переносом излучения, охватывает широкий круг практических применений. В связи с этим на данный момент существует несколько методов решения таких задач, но каждый из них имеет определённые границы применимости. Первичным уравнением, которое описывает взаимодействие радиационного излучения с веществом, является линейное уравнение Больцмана [5], которое называется также кинетическим уравнением Больцмана или транспортным уравнением [209, 184]:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Omega} \nabla \varphi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) + \sum(\mathbf{r}, E) \cdot \varphi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) = \\ = \int_0^{\infty} \int_{4\pi} \varphi(\mathbf{r}, E', \boldsymbol{\Omega}') \cdot \sum_S(E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r}) dE' d\boldsymbol{\Omega}' + Q(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{r}$  - радиус вектор, определяемый тремя пространственными координатами;

$\boldsymbol{\Omega}$  - единичный вектор направления движения частицы, определяемый двумя угловыми переменными;

$E$  - энергия частицы [184]. Уравнение представлено в интегро-дифференциальной форме.

Методы решения уравнения радиационного переноса разделяют на детерминистские и стохастические. Детерминистские методы включают методы сферических гармоник ( $P_N$ ), моментов, собственных функций Кейса, дискретных направлений ( $S_N$ ) (входят потоковые, дискретно-ординатные и конечно-объемные методы [196]), зональные методы [181], методы конечных разностей и ко-

нечных элементов (сеточные методы). К стохастическим относят метод Монте-Карло и лучевые методы [225, 186]. Рассмотрим наиболее важные из них.

При рассмотрении уравнения переноса излучения в дифференциальной форме основная сложность заключается в аппроксимации зависимости интенсивности излучения от направления. Применяют два подхода. Первый подход подразумевает аппроксимацию зависимости интенсивности излучения набором функций, заданных во всем диапазоне телесных углов, в этом случае аппроксимацию называют глобальной. Часто бывает достаточно использование первых членов разложения,  $P_1$ - или  $P_3$ -приближения в методе сферических гармоник [225]. Диффузное приближение -  $P_1$  получается прямым интегрированием уравнения радиационного переноса излучения по всему телесному углу [196]. Используются только  $P_N$ -приближения нечётных порядков, как одно из собственных чисел матрицы потоков равно нулю [213]. Значительным недостатком  $P_N$  метода является недопустимость использования приближений низкого порядка для неоднородных сред с неравномерным рассеянием, при этом для изотропных сред точность таких приближений падает с возрастанием их порядка, а математическая сложность системы моментных уравнений возрастает существенно. Сложной задачей является также нахождение граничных условий для моментных уравнений высоких порядков.[213].

В случае применения метода дискретных направлений ( $S_N$ ) поле радиационного излучения делится на ряд дискретных потоков, соотнесённых отдельным направлениям, каждому из которых применён специальный весовой коэффициент, необходимые для вычисления интегралов излучения. Так, решение уравнения радиационного переноса заменяется решением системы дифференциальных уравнений, характеризующих значения мощности излучения в этих направлениях. Чандрасекхар [23] впервые использовал такой подход, обобщая метод Шустера-Шварцшильда, с тех пор он интенсивно используется для решения задач радиационного переноса [225, 196].

$S_N$ -метод может быть применен для решения практически важных задач глубокого проникновения излучения, а именно, для прогнозирования радиационной обстановки при обслуживании объектов атомной промышленности [194]. Однако, известно, что точность метода дискретных ординат определяется конструкцией квадратурной схемы, т.е. выбором весовых коэффициентов. При этом какие-либо строгие математические принципы, позволяющие определять значения весов, в настоящее время не сформулированы, хотя недавно в этом направлении и были получены достаточно интересные результаты [225]. Указанное обстоятельство существенно снижает эффективность данного метода. Следует отметить, что на основе метода дискретных направлений разработано несколько гибридных методов, например, метод дискретного переноса [100], который совмещает в себе черты потоковых и Монте-Карло методов [196].

В отдельных работах рассматриваются сеточные методы решения уравнения переноса излучения, основанные на методах конечных разностей и конечных элементов [197, 217, 201]. Данные методы широко используются, в частности, для численного решения линейных и нелинейных спектральных задач переноса физики высоких плотностей и энергии. Расчеты этих задач, как правило, проводятся в многогрупповом приближении в двумерной и трехмерной геометриях с одновременным учетом большого количества других физических процессов [222]. К недостаткам метода можно отнести необходимость высокой детализации сеточной структуры для получения удовлетворительной сходимости решений.

Метод угловых коэффициентов или зональный метод используется больше для решения специальных инженерных тепловых задач и задач лазерных мишеней, в случае необходимости учета переноса излучения в полостях конструкций [222] и основывается на численном решении уравнения переноса излучения в оптически прозрачных средах. Для решения задач радиационного переноса с наличием геометрически сложных объектов применяется метод Монте-Карло [196].

Для более полной симуляции взаимодействия радиационного излучения с веществом в условиях эксперимента используют метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло позволяет избежать существенных упрощений, так как по своей природе является статистическим.

Преимущество метода Монте-Карло перед альтернативными методами, основанными на численном решении кинетического уравнения, определяется удобством и приспособленностью этого метода к решению сложных граничных задач в многокомпонентных средах [186]. Поэтому к одним из наиболее важных его применений относят медицинские приложения для расчета распределения доз облучения в теле пациента [153, 190, 191].

В общем случае метод Монте-Карло - это численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин. Относительно к физике частиц впервые метод Монте-Карло упоминается в работах, относящихся к «Манхэттенскому проекту» [169, 168].

Расчет методом Монте-Карло в задачах переноса ионизирующего излучения осуществляется с учетом детального знания сечений (по существу, вероятностей) элементарных процессов взаимодействия ионизирующих частиц с веществом.

Задачи, решаемые методом Монте-Карло в рамках моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом [153, 190, 191]:

- моделирование (генерирование) наблюдаемых величин (импульс, энергия, точка рождения и пр.) на основе теоретических предсказаний - генераторы событий;
- моделирование изменения наблюдаемых величин в результате прохождения частиц через вещество детектора;
- моделирование отклика детектора для отладки алгоритмов реконструкции событий.

В упрощенном виде процесс моделирования методом Монте-Карло выглядит следующим образом: генерируется событие - рождение частицы в определенной точке с заданными энергией и направлением движения, затем рассчитывается длина свободного пробега до первого взаимодействия с веществом, а также определяется вид взаимодействия, дальше, если это не поглощение, определяются энергия и направление частицы (частиц) после взаимодействия, свободный пробег до следующего и.т.д. Расчет продолжается до тех пока частица не поглотится, либо не окажется вне расчетного объема. Все решения по ходу движения частицы принимаются на основе заданных вероятностных оценок. По совокупности множества сгенерированных событий определяются значения интересующих величин [220].

Метод Монте-Карло является методом статистических испытаний, поэтому зачастую требуется значительное время вычислений для достижения необходимой точности, но с учетом значительным развитием вычислительных и программных средств в последнее время, этот недостаток преодолим. Применительно к задачам ядерной физики точность расчета в значительной степени зависит от выбора физической модели моделируемого процесса. Во многих случаях допустимы некоторые упрощения, обусловленные спецификой поставленной задачи, что может уменьшить время расчета.

Математические основы решения уравнения переноса с использованием метода Монте-Карло изложены в работах [209, 184]. Уравнение переноса 1.1 может быть представлено в следующем виде [184]:

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) = & \\ = \psi_1(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) + \int_V \frac{\Sigma(\mathbf{r}, E)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \cdot e^{-\tau(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}, E)} \delta\left(\boldsymbol{\Omega} - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\right) \cdot & \\ \cdot \int_0^\infty \int_{4\pi} \frac{\Sigma_S(E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r})}{\Sigma(\mathbf{r}, E')} \psi(\mathbf{r}, E', \boldsymbol{\Omega}') dE' d\boldsymbol{\Omega}' d\mathbf{r}', & \quad (1.2) \end{aligned}$$

где  $\psi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})$  - плотность первых входящих столкновений.

Затем вводятся понятие кинетического ядра:

$$K(\mathbf{r}', E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow \mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) = T(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r}) \cdot C(E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r}), \quad (1.3)$$

которое показывает какова плотность вероятности для частицы, входящей в столкновение в точке  $\mathbf{r}'$  с энергией  $E'$  и направлением  $\boldsymbol{\Omega}'$  испытать очередное столкновение в точке  $\mathbf{r}$ , имея энергию  $E$  и направление движения  $\boldsymbol{\Omega}$ .

При этом транспортное ядро, представляющее собой плотность вероятности для частицы, вылетающей из точки  $\mathbf{r}'$  в направлении  $\boldsymbol{\Omega}$  с энергией  $E$ , испытать столкновение в точке  $\mathbf{r}$  представляется как:

$$T(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r}) = \frac{\sum(\mathbf{r}, E)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \cdot e^{-\tau(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}, E)} \delta\left(\boldsymbol{\Omega} - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\right). \quad (1.4)$$

А ядро столкновений (рассеяния) :

$$C(E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r}) = \frac{\sum_S(E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega} | \mathbf{r})}{\sum(\mathbf{r}, E')}, \quad (1.5)$$

физический смысл которого заключается в плотности вероятности для частицы, входящей в столкновение в точке  $\mathbf{r}'$  с энергией  $E'$  и направлением движения  $\boldsymbol{\Omega}'$  испытать очередное столкновение в точке  $\mathbf{r}$ , имея энергию  $E$  и направление движения  $\boldsymbol{\Omega}$ .

Таким образом уравнение для плотности столкновений можно представить в операторном виде следующим образом:

$$\psi = \psi_1 + \mathbf{K}\psi. \quad (1.6)$$

Откуда следует, чтобы симулировать перенос излучения, нужно интерпретировать кинетическое ядро  $K(\mathbf{r}', E', \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow \mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})$  с точки зрения вероятностных подходов и представить его как плотность вероятности перехода из точки  $\mathbf{r}'$  в точку  $\mathbf{r}$  [184].

Для моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом существует целый ряд программных кодов, использующих вероятностный подход и основывающихся на методе Монте-Карло, таких как: PENELOPE, FLUKA, EGS, ITS, MCNP, Geant4, TALYS, FASTRAD.

Каждое из указанных программных средств имеет свою область применения, свои особенности и ограничения. Так, код EGS допускает моделирование испускания частиц (электронов, позитронов, фотонов) лишь в узком диапазоне энергий от 1 кэВ до нескольких ГэВ и применяется в основном для моделирования электромагнитных ливней, в то время как код MCNP используется большей частью в области физики ядерных реакторов и радиационной защиты, при этом код MCNP, также как и FLUKA, имеет серьезные лицензионные ограничения.

В зависимости от поставленной задачи результаты расчетов, выполненных в различных пакетах, могут различаться в связи с тем, что каждый пакет разрабатывался под определенный круг задач. В этом смысле наиболее универсальным инструментом моделирования процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом является программный код Geant4, который, к тому же, обладает следующими преимуществами:

- является свободным кроссплатформенным программным обеспечением с открытым кодом (имеет реализации под Windows, MacOS, Linux и другие UNIX-подобные операционные системы);
- позволяет моделировать полный набор частиц (протоны, электроны, альфа-частицы, гамма-кванты, нейтроны) в широком энергетическом диапазоне;
- предоставляет богатый функционал для описания свойств материалов;

Кроме того, следует отметить, что библиотека Geant4 написана на компиляционном языке высокого уровня C++, имеет мощные средства для визуализации и разработки пользовательского интерфейса, позволяет создавать и

импортировать 3D-геометрию любой сложности. Физические модели, применяемые для моделирования различных процессов (электромагнитные процессы, адронные процессы, фотон-адронные и лептон-адронные процессы, процессы с участием оптических фотонов и.т.д) в Geant4 постоянно уточняются по мере обновления базы экспериментальных данных. Используя код Geant4, возможно максимально близко воспроизвести в модели условия реального эксперимента. Основные области применения Geant4: физика частиц, ядерная физика, космическая индустрия, медицинская физика, разработка линейных ускорителей.

Библиотека Geant4 используется крупными международными проектами, в том числе и для моделирования экспериментов на Большом адронном коллайдере (ATLASS, ALICE, GAUSS). На базе Geant4 создаются как приложения специального назначения (GATE - программное обеспечение для моделирования медицинских томографических систем), так и универсальные программы для моделирования взаимодействия радиационного излучения с веществом, в том числе и коммерческие (FASTRAD).

## **Выводы**

Рассмотрены существующие на сегодняшний день первичные преобразователи, устройства и системы в области автоматизированного радиационного контроля и управления, прежде всего различные виды оптических волоконных преобразователей, их основные характеристики и параметры, а также типовые схемы организации архитектуры систем на их основе.

Проведённый анализ показал, что волоконные системы автоматизированного 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.

Установлено, что первичные волоконные преобразователи на основе специальных (сцинтилляционных и спектросмещающих) волокон являются наиболее перспективным направлением в разработке волоконных мониторинговых систем, в связи с относительной простотой организации таких систем, надежностью, низкой себестоимостью в связи отсутствием необходимости в дорогостоящем оборудовании и разработке сложных программных алгоритмов для развитого анализа оптических сигналов. При этом выявлено, что для решения задач, связанных с определением мощности дозы радиационного излучения, активности и положения источников радиационного излучения различных видов требуется разработка и исследование новых архитектур волоконных мониторинговых систем, обладающих свойствами многоканальности, универсальности, модульности и расширяемости с использованием в качестве элементов новых первичных преобразователей на основе специальных волокон.

Проанализированы численные методы моделирования в области теории радиационного переноса, показано, что для решения задач симуляции экспериментов с использованием радиационных источников и разрабатываемых преобразователей наилучшим выбором является применение методов Монте-Карло, в связи с имитационной природой метода и возможностью решения сложных многогранных задач с контролируемой точностью.

## Глава 2

# **Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения активности радиационных источников бета-излучения**

### **2.1. Первичный оптико-волоконный преобразователь для регистрации бета-излучения как элемент системы автоматизированного радиационного контроля и управления**

В данной главе в качестве элемента системы автоматизированного радиационного контроля и управления предлагается оптико-волоконный преобразователь для измерения активности источника радиационного излучения [150, 207, 199, 205, 208]. Конструкции оптико-волоконных преобразователей на базе специальных волокон, как уже указывалось предыдущей главе, предоставляют ряд преимуществ, таких как электромагнитная помехозащищенность, радиационная стойкость, возможность создания многоканальных и распределенных мониторинговых систем. Рассмотрим конструкцию предлагаемого оптико-волоконного преобразователя (Рисунок 2.1) [199, 211]. Основным элементом конструкции является сенсорный элемент из сцинтилляционного волокна 1, располагающийся внутри корпуса преобразователя, а именно, уложенный спиралью по боковой поверхности цилиндрического отверстия, предусмотренного в корпусе преобразователя. Один из выходов сцинтилляционного волокна выведен на оптический коннектор 4, размещенный на торцевой поверхности корпуса преобразователя,

второй зазеркален.

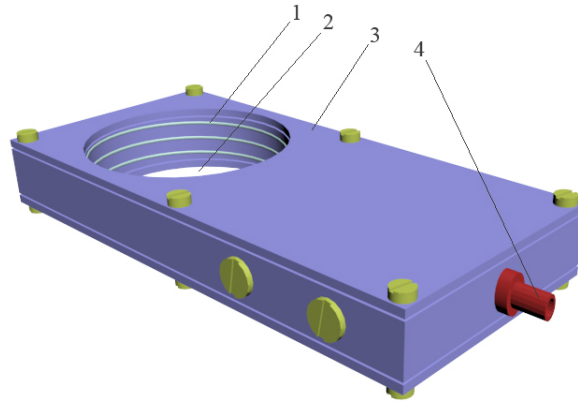


Рисунок 2.1 - Модель волоконного преобразователя: 1 - сцинтилляционное волокно, 2 - отверстие в корпусе, 3 - крышка корпуса, 4 - оптический коннектор

Такой оптико-волоконный преобразователь работает по следующему принципу: под воздействием падающего излучения от радиационного источника, находящегося в центре цилиндрического отверстия в корпусе преобразователя, в сцинтилляционном волокне продуцируется оптическое излучение за счет наличия радиолуминесцентных примесей в составе сердцевины волокна. Часть произведенного излучения захватывается волокном и распространяется к его выходам, учитывая, что один из торцов волокна покрыт светоотражающим покрытием, суммарный оптический сигнал с преобразователя собирается с оптического коннектора 4. Количество оптических фотонов на выходе преобразователя зарегистрированных в единицу времени пропорционально активности источника радиационного излучения. Чувствительность такого преобразователя во многом зависит от сцинтилляционной эффективности волокна, выбранного в качестве сенсорного элемента и его геометрической конфигурации, а точнее количества витков спирали по которой уложено волокно. В связи с этим сцинтилляционное волокно BSF-60 («Saint-Gobain Crystals» [147, 96]) для использования в предлагаемой конструкции выбиралось исходя из максимального значения сцинтилляционной эффективности (2,5% - 7000 фотонов на 1МэВ поглощенной в опти-

ческом волокне радиационной энергии) и показателя радиационной стойкости. Оптимальная геометрическая конфигурация сенсорного элемента подбиралась путем численного моделирования процесса взаимодействия радиационного излучения с предложенным оптико-волоконным преобразователем.

Возможная схема подключения описанного волоконного преобразователя к системе автоматизированного радиационного контроля и управления приведена на рисунке 2.2. Такой оптико-волоконный преобразователь 8 подключается посредством транспортного оптического волокна к одному из входов оптического коммутатора универсальным способом. Число подключенных к системе оптико-волоконных преобразователей ограничивается только лишь числом свободных портов коммутатора. Измерительный функционал оптико-волоконного преобразователя определяется программным образом с использованием разработанной численной модели и вычисленной с ее помощью калибровочной функции.

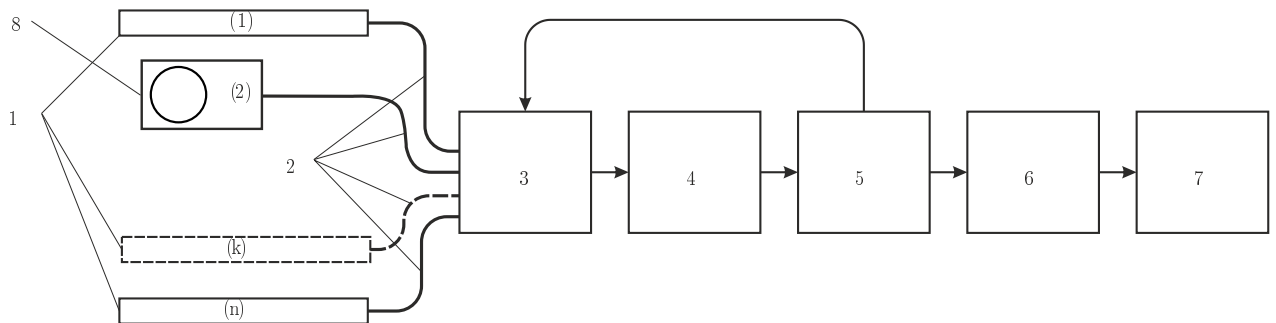


Рисунок 2.2 - Схема включения первичного волоконного преобразователя для измерения активности радиационных бета-источников в состав системы автоматизированного радиационного контроля и управления

## 2.2. Численная модель первичного оптико-волоконного преобразователя для регистрации бета-излучения

В связи с тем, что проведение экспериментальных исследований требует определенных экономических затрат, а также для оптимизации конструкции

оптико-волоконного преобразователя, решалась задача симуляции процессов детектирования радиационного бета-излучения оптико-волоконным преобразователем.

Моделирование проводилось в две стадии. На первой стадии выполнялся расчет числа бета-электронов, выпущенных источником ионизирующего излучения и попавших в чувствительное сцинтилляционное волокно с учетом потерь энергии в воздух и стекле, на втором - выполнялся расчет поглощенной в волокне энергии радиационных частиц, числа оптических фотонов произведенных в процессе радиолуминесценции, числа оптических фотонов с учетом потерь в волокне достигших фотоприемника и зарегистрированных счетчиком импульсов [65, 151, 202, 150, 149].

Численная модель оптико-волоконного преобразователя разрабатывалась для оптимизации его конструкции 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 автоматизированного радиационного контроля и управления, а также проводить предварительные численные эксперименты с источниками радиационного излучения.

Модель использует для расчета численные методы Монте-Карло в реализации библиотек для моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом Geant4 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. Поскольку

структура атомных оболочек имеет большее значение во многих случаях при низких энергиях чем при высоких, низкоэнергетические процессы используют напрямую данные об оболочечных сечениях.

Стандартные процессы, которые оптимизированы для физики высоких энергий, часто опираются на параметризацию этих данных. Реализация низкоэнергетических процессов применима для элементов с атомными номерами от 1 до 99 и для энергий до 10 эВ, верхний предел зависит от конкретного процесса.

Универсальный способ расчет полного сечения взаимодействия с использованием библиотечных данных и интерполяции выглядит следующим образом [28]:

$$\log(\sigma(E)) = \frac{\log(\sigma_1) \log(E_2/E) + \log(\sigma_2) \log(E/E_1)}{\log(E_2/E_1)}, \quad (2.1)$$

где  $E$  - актуальная энергия;

$E_1$  и  $E_2$  - соответственно меньшее и большее значения энергии, для которых данные о сечениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  доступны.

Для других процессов метод интерполяции выбирается в зависимости от формы сечения взаимодействия.

Класс `G4LivermoreIonisationModel` вычисляет непрерывную отдачу энергии электроном в процессе ионизации и симулирует генерацию вторичных частиц электроном. Порог генерации вторичного электрона для данного материала  $T_c$  используется для разделения непрерывной и дискретной частей процесса. Потеря энергии падающим электроном с энергией  $T$  выражается через сумму по всем атомным оболочкам  $s$  и интеграл по энергии  $t$  вторичных электронов [28]:

$$\frac{dE}{dx} = \sum_s \left( \sigma_s(T) \frac{\int_{T_{min}}^{T_c} t \frac{d\sigma}{dt} dt}{\int_{T_{min}}^{T_{max}} t \frac{d\sigma}{dt} dt} \right), \quad (2.2)$$

где  $T_{max} = 0,5T$  - максимальная энергия переданная вторичному электрону;

$\sigma_s(T)$  - полное сечение взаимодействия для оболочки  $s$  при данной кинетической энергии падающей частицы  $T$ ;

$T_{min} = 0,1$  эВ - это нижний энергетический порог из базы EEDL.

Сечение взаимодействия для генерации вторичного электрона - комплексная функция[28]:

$$\sigma(T) = \sum_s \left( \sigma_s(T) \frac{\int_{T_c}^{T_{max}} t \frac{d\sigma}{dt} dt}{\int_{T_{min}}^{T_{max}} t \frac{d\sigma}{dt} dt} \right). \quad (2.3)$$

Отдельные сечения взаимодействия  $\sigma_s$  получаются из интерполяции расчетных данных о сечениях в EEDL библиотеке в соответствии с формулой (2.1) универсального расчета полных сечений взаимодействий. Вероятность эмиссии вторичного электрона с кинетической энергией  $s$  подоболочки  $s$  энергии связи  $B_s$  как результат взаимодействия входящего электрона с кинетической энергией  $T$  описывается как:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{P(x)}{x^2}, \quad (2.4)$$

где  $x = \frac{t+B_s}{T+B_s}$ , при этом параметр  $x$  варьируется от  $x_{min} = (0,1 + B_s)/(T + B_s)$  до 0,5.

Функция  $P(x)$  параметризуется дифференциально в 3 областях  $x$ : от  $x_{min}$  до  $x_1$  используется линейная интерполяция с линейным размером в 4 точки; от  $x_1$  до  $x_2$  - линейная интерполяция с логарифмическим масштабом в 16 точек используется; от  $x_2$  до 0,5 следующая интерполяция:

$$P(x) = 1 - gx + (1 - g)x^2 + \frac{x^2}{1 - x} \left( \frac{1}{1 - x} - g \right) + A \cdot \frac{(0,5 - x)}{x}, \quad (2.5)$$

где  $A$  - подгоночный коэффициент;

$g$  выражается через гамма-фактор входящего электрона:

$$g = (2\gamma - 1)/\gamma^2. \quad (2.6)$$

Для случая высоких энергий ( $x \gg 1$ ) выражение (2.5) превращается в электрон-электрон рассеяние по Мольеру [63, 111].

Значение коэффициента  $A$  для каждого элемента получается как результат сглаживания спектра из EEDL для энергий, которые доступны в базе данных. Значения  $x_1$  и  $x_2$  выбираются для каждой атомной оболочки в соответствии со спектром вторичных электронов в этой оболочке. Отметим что  $x_1$  соответствует максимуму спектра, если спектр не совпадает с  $x_{min}$ . Зависимость всех 24 параметров от падающей энергии  $T$  вычисляется в логарифмической интерполяции (2.1). Класс `G4LivermoreBremsstrahlungModel` используется для вычисления непрерывных потерь энергии во время процесса излучения гамма-квантов и симулирует генерацию гамма-излучения электронами. Энергетический порог для данного материала  $\omega_c$ , при котором происходит генерация излучения, используется для того, чтобы разделить непрерывную и дискретную части процесса. Потери энергии падающего электрона с энергией  $T$  выражаются через подинтегральную функцию от энергии гамма-квантов [28]:

$$\frac{dE}{dx} = \sigma(T) \frac{\int_{T_{min}}^{\omega_c} t \frac{d\sigma}{d\omega} dt}{\int_{T_{min}}^T t \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega}, \quad (2.7)$$

где  $\sigma(T)$  - полное сечение при данной энергии падающей частицы  $T$ ;

$T_{min} = 0,1$  эВ - это нижний энергетический предел для библиотеки данных EEDL.

Производное сечение является комплиментарной функцией:

$$\sigma(T) = \sigma(T) \frac{\int_{\omega_c}^T \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega}{\int_{T_{min}}^T \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega}. \quad (2.8)$$

Полное сечение  $\sigma_s$  получается посредством интерполяции оценочных данных о сечениях в EEDL-библиотеке [125].

EEDL-данные [64] о полных сечениях параметризуются в соответствии с 2.1 [125]. Вероятность эмиссии фотона с энергией  $\omega$ , с учетом кинетической



энергией налетающего электрона  $T$ , генерируются в соответствии с формулой:

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \frac{F(x)}{x}, \quad (2.9)$$

где  $x = \frac{\omega}{T}$ , функция  $F(x)$ , описывающая энергетический спектр исходящих фотонов содержится в EEDL-библиотеке. Для каждого элемента используются 15 значений  $x$  из интервала 0,001 - 1 для линейной интерполяции функции. Функция  $F$  нормируется по условию  $F(0,01) = 1$ . Энергетические распределения испускаемых фотонов доступны в EEDL библиотеке только для нескольких энергий падающих электронов (около 10 точек по энергии между 10 эВ и 100 ГэВ). Для других энергий используется формула для логарифмической интерполяции 2.1, чтобы получить значения для функции  $F(x)$ . Для высоких энергий, спектральная функция близка к:

$$F(x) = 1 - x + 0,75x^2. \quad (2.10)$$

Угловое распределение излучаемых фотонов относительно налетающего электрона может быть выбрано в соответствии с тремя альтернативными генераторами описанными выше. Направление исходящего электрона определяется из энерго-моментного баланса. Генераторы на данный момент реализованы в G4ModifiedTsai, G4Generator2BS и G4Generator2BN классах.

Угловое распределение излучаемых фотонов получается из упрощенной формулы [63], основанной на сечении Тцаи (Tsai) [166, 167], которое рассматривается как изотропное при низких энергетических пределах.

В G4Generator2BS генераторе, угловое распределение излучаемых фотонов получается из 2BS Коч (Koch) и Моц (Motz) двойного дифференциального сечения тормозного излучения [91]. При эффективности преобразования энергии бета-электронов в энергию фотонов  $y_{ph} = 7000 \text{ МэВ}^{-1}$  для исследуемого сцинтилляционного волокна можно рассчитать число фотонов, рождаемых в

сцинтилляционном волокне:

$$N_0 = y_{ph} \cdot E_e, \quad (2.11)$$

где  $E_e$  - суммарная энергия переданная волокну бета-частицами при поглощении, рассчитанная с помощью метода Монте-Карло.

Так как направления распространения рожденных в сцинтилляционном волокне фотонов равновероятны, долю фотонов, попавших в сердцевину волокна и распространяющихся к фотоприемнику можно определить из телесного угла, соответствующего числовой апертуре волокна:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{n_c}{n_{cl}} \right), \quad (2.12)$$

где  $\varepsilon_a$  - коэффициент захвата фотонов волокном,  $n_{cl}$  и  $n_c$  - показатели преломления оболочки и сердцевины волокна, соответственно. Так, для сцинтилляционного волокна BSF-60  $\varepsilon_a = 0,034$ .

Потери на стыках волокон  $\varepsilon_{tr}$  определяются по формулам [211]:

$$\varepsilon_{na} = -20 \log(A1/A2), \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_d = -20 \log(D1/D2), \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{tr} = \varepsilon_{na} \cdot \varepsilon_d, \quad (2.15)$$

где  $\varepsilon_{na}$  - потери оптической мощности, связанные с несовпадением числовых апертур сердцевины волокон;

$N_{A1}$  и  $N_{A2}$  - числовые апертуры сцинтилляционного и транспортного волокон;

$\varepsilon_d$  - потери оптической мощности, обусловленные различием диаметров указанных волокон,  $N_{D1}$  и  $N_{D2}$  - диаметры сцинтилляционного и транспортного

волокон.

Коэффициент затухания в транспортном волокне можно определить как

$$\varepsilon_{at} = e^{\alpha \cdot L}. \quad (2.16)$$

Так, при длине транспортного волокна  $L = 4$  м коэффициент  $\varepsilon_{at}$  равен 0,37.

Таким образом, общее количество оптических фотонов, достигших фотоприемника с учетом ослабляющих факторов определяется выражением:

$$N_p = \varepsilon_a \cdot \varepsilon_{at} \cdot \varepsilon_{tr} \cdot N_o. \quad (2.17)$$

С учетом эффективности фотоприемника  $\varphi$  и скорости счета при отсутствии излучения на входе фотоприемника (темновой сигнал)  $N_d$  выражение для скорости счета фотонов в зависимости от активности источника ионизирующего излучения имеет вид:

$$N_{cf} = \varphi \cdot N_p + N_d. \quad (2.18)$$

### **2.3. Разработка программного обеспечения для реализации численной модели первичного оптико-волоконного преобразователя для регистрации бета-излучения**

Для реализации численной модели было разработано оригинальное программное обеспечение с использованием библиотек классов Geant4. На рисунке 2.3 приведена структурная схема представленного программного модуля.

Разработанный программный модуль состоит из нескольких взаимодействующих частей:

- а) Программная оболочка, которая включает в себя подсистемы импорта параметров, экспорта результатов моделирования, визуализации результа-

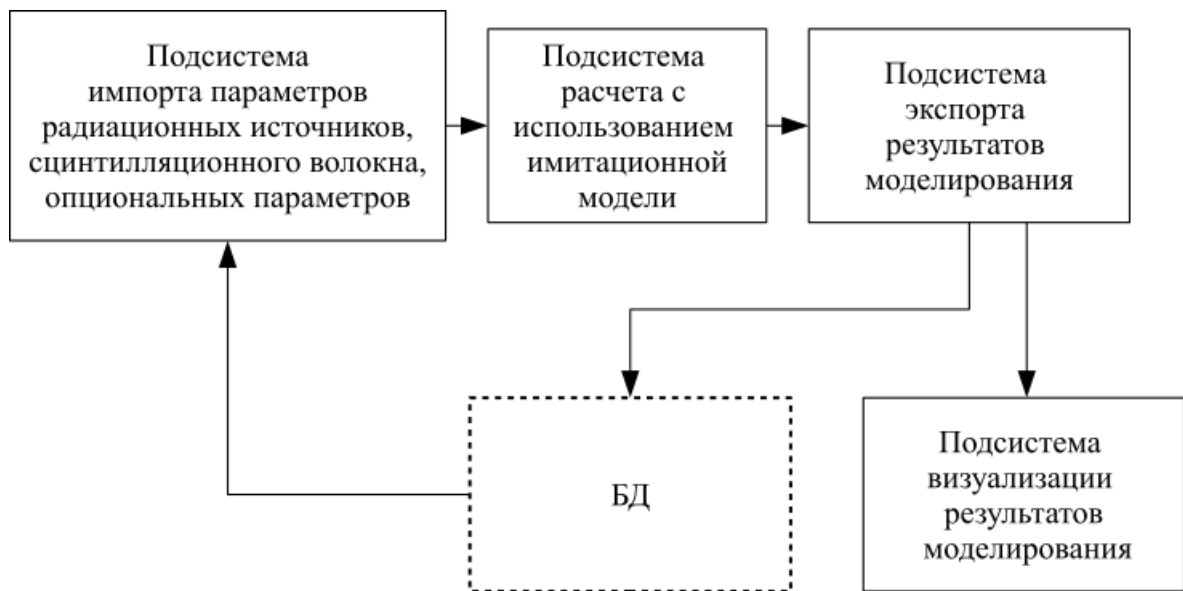


Рисунок 2.3 - Структурная схема программного обеспечения для реализации модели волоконного преобразователя

тов моделирования, и предоставляет интерфейс экспорта/импорта данных из базы данных и текстовых файлов, а также программные средства для запуска процесса моделирования и визуализации результатов расчета;

- б) Программное ядро модуля, которое реализуется с использованием библиотеки классов Geant4, на языке высокого уровня C++, для выполнения непосредственно расчета количества оптических фотонов на торце чувствительного волокна, а затем, количества электрических импульсов на выходе счетчик фотонов, а также для нахождения вида калибровочной функции волоконного преобразователя, исходя из заданных начальных условий с использованием предложенной численной модели.

Постановка задачи требует разработки ядра программного модуля для выполнения непосредственно расчета уровня ионизирующего излучения, исходя из заданных начальных условий с использованием сложных математических алгоритмов и численных методов, что само по себе, с учетом имеющихся средств, является сложной и трудновыполнимой задачей. По этой причине среди доступных кодов для моделирования взаимодействия радиационного излучения с веществом был выбран код Geant4, написанный на языке C++, который наибо-

лее универсален для решения широкого круга задач и является открытым программным обеспечением. Кроме того библиотека Geant4 может быть использована для разработки программного обеспечения для различных операционных систем, таких как Windows NT, POSIX (GNU/Linux, BSD). Для расчета уровня ионизирующего излучения кодом Geant4, который составляет ядро программного модуля, используется математический метод Монте-Карло.

Программный модуль реализует следующие функции:

- импорт параметров радиационных источников: количество, активность, энергетический спектр, геометрическая форма, положение и размеры, направленность излучения в следующих форматах: текстовый файл;
- импорт параметров чувствительного волокна: геометрическая форма, положение и размеры, сцинтилляционная эффективность, материал, вариант конструкции в следующих форматах: GDML;
- импорт дополнительных геометрических объектов, необходимых для проведения предварительного численного эксперимента с указанием свойств в следующих форматах: GDML;
- расчет количества оптических фотонов на торце чувствительного волокна;
- расчет количества электрических импульсов на выходе счетчика фотонов;
- нахождение вида калибровочной функции на основе расчетных данных;
- экспорт результатов моделирования в файл или базу данных в следующих форматах: текстовый файл.

Программный модуль в ходе своей работы использует типы входных данных:

- а) файл в формате GDML, содержащий трёхмерное представление модели чувствительного элемента или дополнительного объекта необходимо для симуляции эксперимента, который может быть использован для осуществления моделирования с использованием предложенной модели;
- б) текстовый файл, содержащий набор текстовых директив, пригодных к распознаванию расчетным ядром на базе Geant4, описывающих размеры, активность, энергетические спектры излучения радиационных источников и другие параметры, необходимые для численного моделирования.

Программный модуль в ходе своей работы создаёт следующие типы выходных файлов:

- а) файл в формате CSV, содержащий информацию о значениях скорости счета импульсов при различных активностях источников радиационного излучения;

Программный модуль в ходе своей работы осуществляет запись выходной информации в соответствующие таблицы базы данных.

Предложенная реализация модели 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 автоматизированного радиационного контроля и управления, а также проводить предварительные численные эксперименты с источниками радиационного излучения. В связи с этим пользователю предоставляется интерфейс на базе классов Qt(C++), позволяющий произвести запуск расчета, остановить расчет, импортировать и экспортировать необходимые входные и выходные данные. Предоставляется инструментарий для ручного редактирования производимых модулем экспортных записей в базу данных. Процесс расчета

уровня ионизирующего излучения сопровождается индикацией, предусмотренной в графическом интерфейсе пользователя, статус состояния расчета также отображается в специальном поле в базы данных, значение которого меняется по завершении процесса расчета и экспорта в базу данных его результатов.

На рисунках 3.4 и 3.5 представлены алгоритм работы приложения и программный интерфейс соответственно.

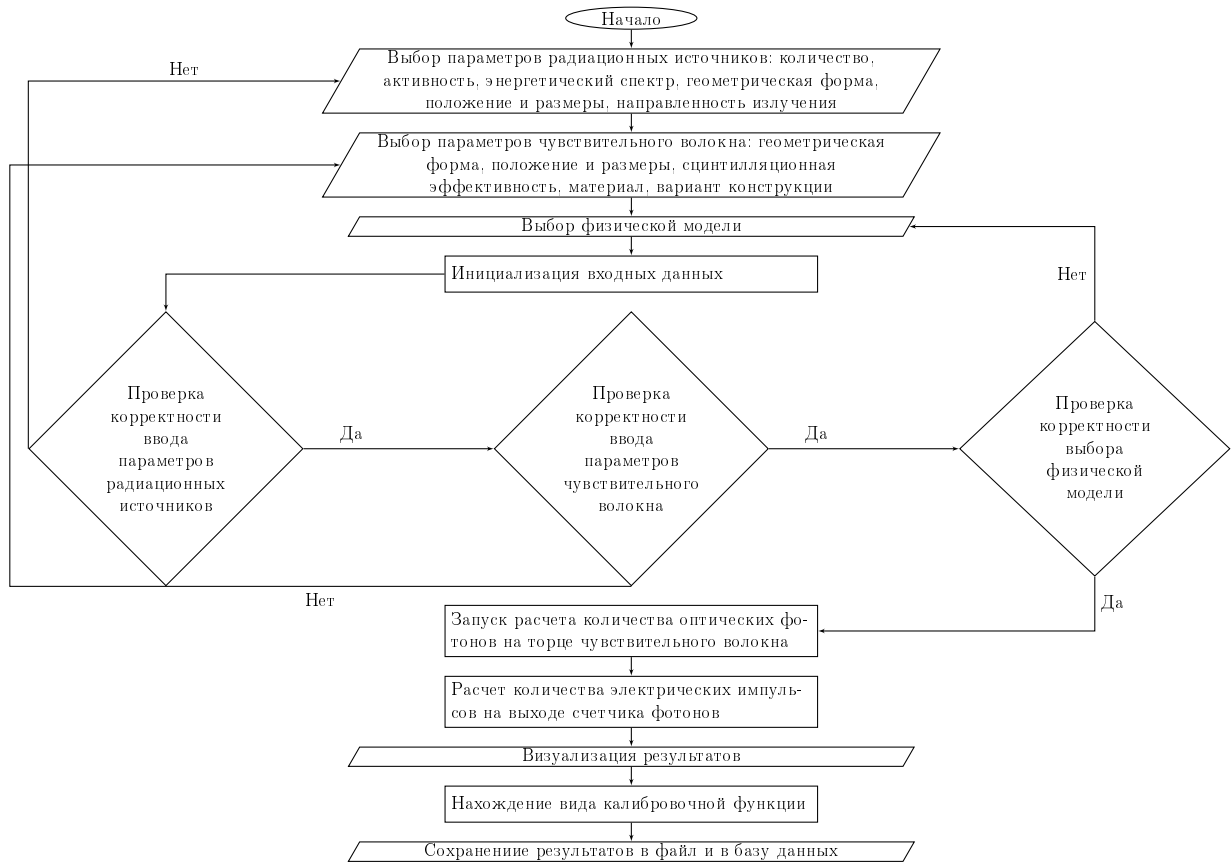


Рисунок 2.4 - Блок-схема алгоритм работы программного обеспечения для реализации модели волоконного преобразователя

Системные программные средства, используемые программой, представлены локализованной версией операционной системы Linux или аналогичной. Прикладные программные средства представлены пакетом для моделирования взаимодействия радиационного излучения с веществом Geant4 версии не ниже 4.10, кроссплатформенной библиотекой Qt версии не ниже 5.5.

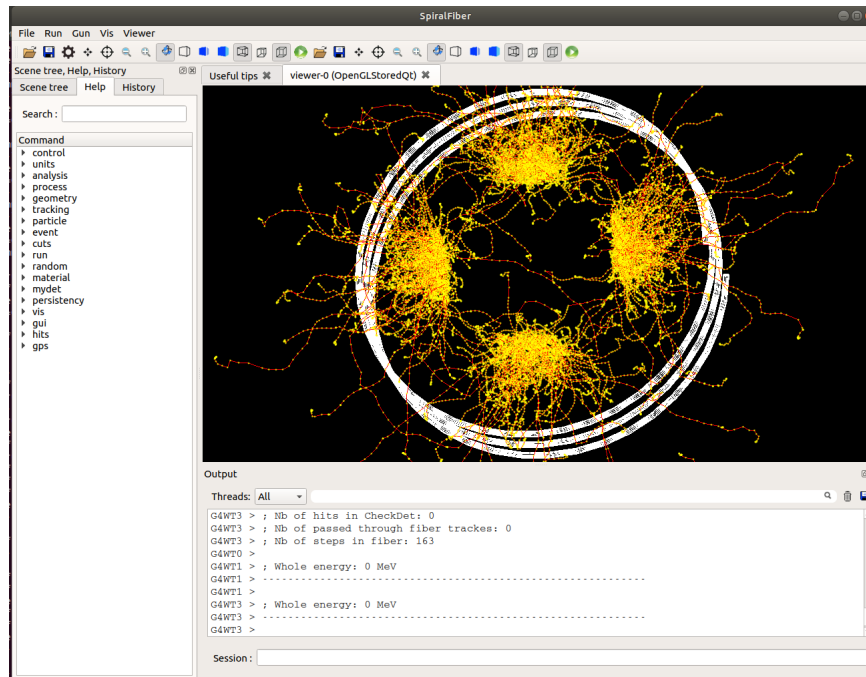


Рисунок 2.5 - Пользовательский интерфейс программного обеспечения для реализации модели волоконного преобразователя

## 2.4. Экспериментальные исследования образца оптико-волоконного преобразователя для регистрации бета-излучения с использованием радиационных источников на базе изотопов $^{63}\text{Ni}$ , $^{89}\text{Sr}$ и $^{90}\text{Sr}$

Экспериментальные исследования образца первичного оптико-волоконного преобразователя в составе системы автоматизированного радиационного контроля и управления проводились с использованием радиационных источников на базе  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ . Предварительно было выполнено численное моделирование экспериментов на основе предложенной модели в реализации разработанного программного обеспечения. В процессе проведения численных экспериментов были построены 3D-модели сенсорного элемента на основе сцинтилляционного волокна BSF-60, скрученного в виде спирали с различными диаметром, высотой и количеством витков. Полученные модели импортировались непосредственно в программный модуль с помощью специального GDM-L-парсера. Также были разработаны файлы конфигураций, описывающие модели источ-



ников ионизирующего излучения: плоских источников на базе  $^{63}\text{Ni}$ , объемных цилиндрических источников на основе  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Для задания энергетических спектров излучения источников использовались базы данных ENDF (Evaluated Nuclear Data File) от NNDC (National Nuclear Data Center), а также данные из литературы [57, 70].

Для проверки полученной модели в «ОАО ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград) были изготовлены источники бета-излучения на основе изотопов  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Плоские источники  $^{63}\text{Ni}$  площадью  $1\text{ см}^2$  ( $1\times 1\text{ см}$ ) получены электрохимическим осаждением металлического никеля на никелевую фольгу, толщиной  $50\text{ мкм}$  из сернокислого электролита состава:  $0,1\div 0,16\text{ моль/л NiSO}_4 + 0,15\text{ моль/л N}_2\text{SO}_4 + 0,65\text{ моль/л H}_3\text{BO}_3$  ( $\text{pH} = 5$ ). Было изготовлено 4 образца с активностями 22,8; 22,5; 26,2 и 26,6 мКи. Для  $^{63}\text{Ni}$  энергия испускаемых бета-электронов варьируется в диапазоне от 0 до 66,7 кэВ (Рисунок 2.6а) со средним значением  $E_e = 17,1\text{ кэВ}$  [57]. Также были подготовлены по 5 источников в виде растворов хлорида  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с одинаковым набором активностей 0,625; 1,25; 2,5; 5 и 10 мКи. Растворы размещались в стеклянном флаконе с толщиной стенки 1 мм. Объем растворов для каждой активности составлял 5 мл. Энергия испускаемых бета-электронов варьируется в диапазоне для  $^{89}\text{Sr}$  - до 1491 кэВ со средним значением  $E_e = 583\text{ кэВ}$  [57], для  $^{90}\text{Sr}$  - до 546 кэВ со средним значением  $E_e = 196\text{ кэВ}$  (рисунки 2.6б и 2.6в) [57]. При проведении измерений чувствительности сцинтилляционного волокна источники на основе  $^{63}\text{Ni}$  располагались на боковой поверхности специального пластикового цилиндра высотой 40 мм и диаметром 30 мм. На рисунке 2.7, а приведено расположение элементов в эксперименте. Пластиковый цилиндр 1, на боковой поверхности которого на высоте 5 мм от нижнего основания размещены радиационные источники 2, помещался в центр круглого отверстия диаметром 60 мм в корпусе сенсорного элемента. Цилиндр размещался в отверстии таким образом, чтобы активные поверхности источников были обращены к виткам сцинтилляционного волокна, расположенным на внутренней поверхности

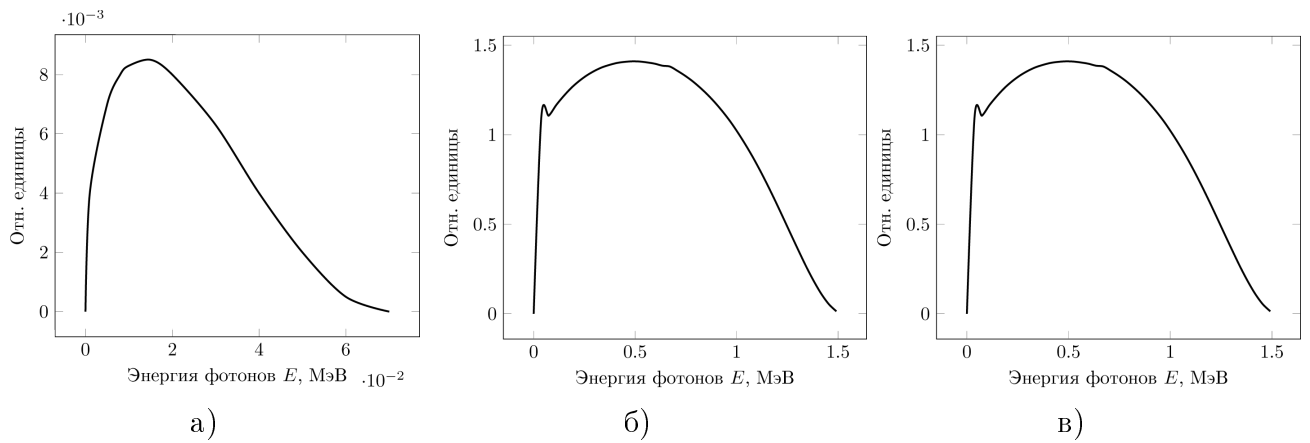


Рисунок 2.6 - Спектры радиационных источников на базе изотопов  $^{63}\text{Ni}$  а),  $^{89}\text{Sr}$  б) и  $^{90}\text{Sr}$  в)

отверстия корпуса сенсорного элемента. Сенсорный элемент 3 содержал 3 витка сцинтилляционного волокна. Высота намотки - 15 мм. Расстояние от источников бета-излучения до сцинтилляционного волокна - 12 мм. Предварительно для описанной схемы эксперимента выполнялся расчет суммарной энергии, переданной сцинтилляционному волокну попавшими в него электронами. Расчет проводился методом Монте-Карло с использованием предложенной численной модели с помощью разработанного программного обеспечения для вариантов конструкции оптико-волоконного преобразователя, отличающихся различными геометрическими конфигурациями сцинтилляционного волокна (1, 2 или 3 - количества витков спирали, по которой уложено волокно)(рисунок 2.7, б). По результатам расчета (рисунок 2.8) был выбран наиболее эффективный вариант конструкции преобразователя с наибольшей чувствительностью, содержащий именно 3 витка сцинтилляционного волокна.

При проведении эксперимента сенсорный элемент и цилиндр с закрепленными на нем источниками помещались в светонепроницаемый контейнер для снижения уровня темнового счета, который составил  $35 - 40 \text{ с}^{-1}$ . Изменение общей активности источников реализовывалось за счет того, что источники последовательно удалялись с поверхности цилиндра. На рисунке 2.9 приведены результаты экспериментальных измерений скорости счета импульсов от активности источников для  $^{63}\text{Ni}$ , а также результаты моделирования (черные круги),

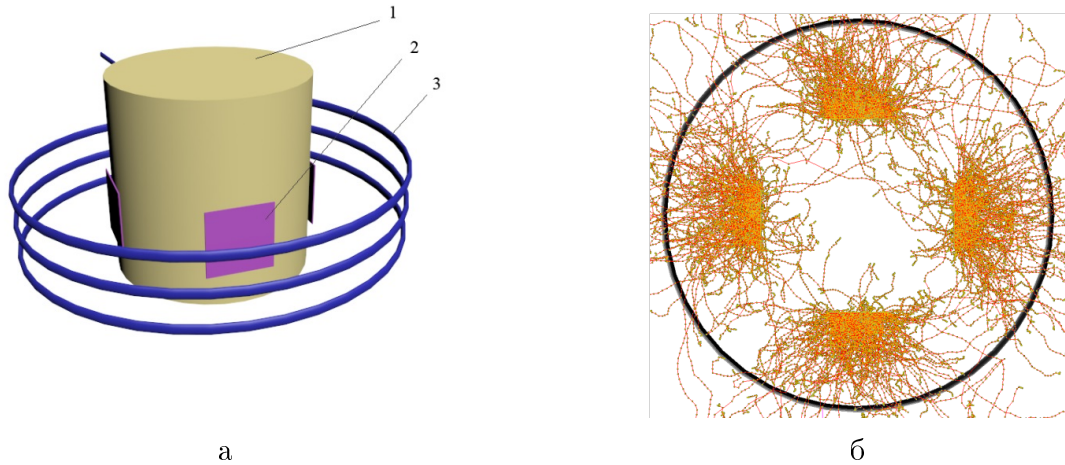


Рисунок 2.7 - Источники на основе  $^{63}\text{Ni}$ : а) - схема эксперимента, б) - визуализация траекторий бета-частиц

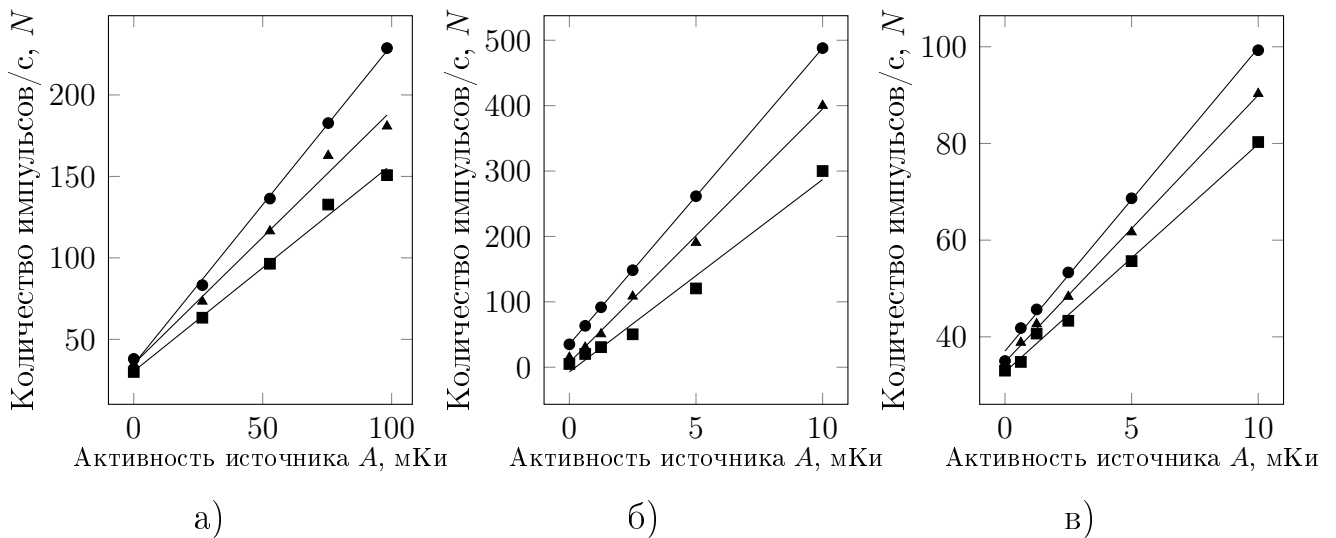


Рисунок 2.8 - Расчетные зависимости количеств импульсов, полученных за единицу времени, от активности источников на основе  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для различных геометрических конфигураций сцинтилляционного волокна. Количество витков спирали, по которой уложено сцинтилляционное волокно: (квадраты - 1, треугольники - 2, круги - 3)

выполненные при помощи предложенной численной модели. Полученные экспериментальные данные в пределах погрешности измерения хорошо согласуются с результатами расчета.

Схема проведения эксперимента с использованием источников на основе хлоридов стронция приведена на рисунке 2.9а. Она аналогична эксперименту с  $^{63}\text{Ni}$  - образцы с заданными активностями 0,625; 1,25; 2,5; 5 и 10 мКи поочередно помещались в центр круглого отверстия корпуса сенсорного элемента. Отличие

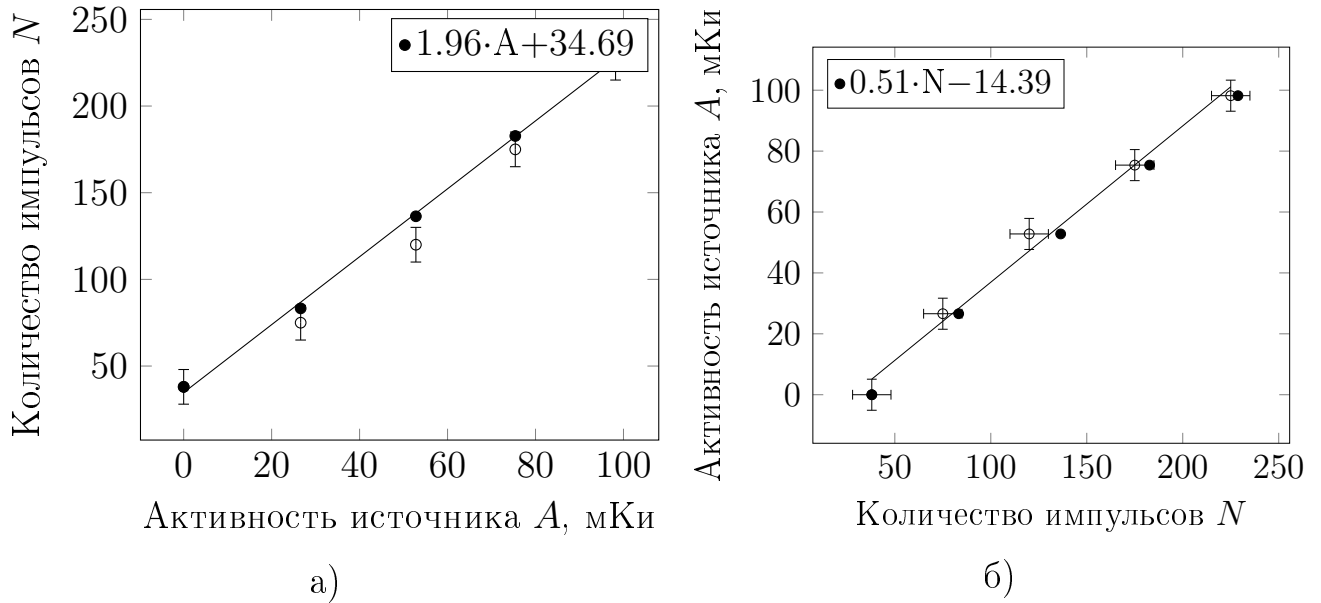


Рисунок 2.9 - Зависимость количества импульсов в единицу времени от активности источников на основе  $^{63}\text{Ni}$  а) и калибровочная зависимость активности источника от скорости счета импульсов, аппроксимированная линейной функцией б) (черные круги - расчет, полые круги - эксперимент)

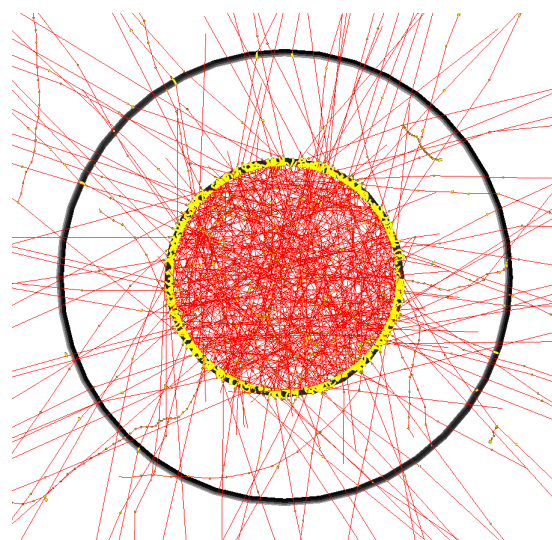
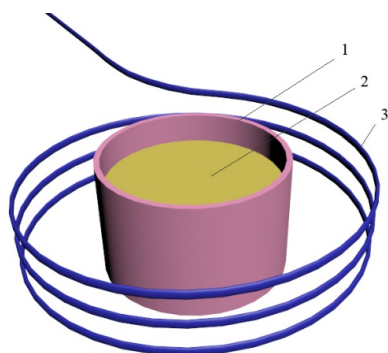
состоит в том, что в этом случае источником излучения являлась жидкость - хлорид стронция, размещаемая в стеклянном флаконе с толщиной стенок 1 мм. На рисунке 2.9б приведены результаты расчета траекторий бета-частиц методом Монте-Карло с использованием предложенной численной модели.

На рисунках 2.12а и 2.12б приведены результаты экспериментальных измерений скорости счета импульсов от активности источников для  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , соответственно, а также результаты расчета, выполненного при помощи описанной модели.

Погрешности измерений скорости счета рассчитывались следующим образом [198]:

- а) Вычислялось среднее арифметическое значение результатов наблюдений, принимаемое за результат наблюдений:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2.19)$$



- а) Схема эксперимента. 1 - стеклянный флакон, 2 - источник на основе хлорида стронция, 3 - сцинтилляционное волокно
- б) Визуализация траекторий бета-частиц.

Рисунок 2.10 - Источники на основе  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$

где  $N_i$  -  $i$ -результат наблюдения количества импульсов в единицу времени;  
 $n$  - число результатов наблюдений;

- б) вычислялось среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  результата наблюдений:

$$\sigma(\bar{N}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n - 1}}; \quad (2.20)$$

- в) так как количество наблюдений  $n < 10$ , проверка гипотезы о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону распределения не проводилась;
- г) случайная составляющая погрешности результата измерения  $\varepsilon$  определялась следующим образом:

$$\varepsilon = t \cdot \sigma(\bar{N}), \quad (2.21)$$

где  $t = 2,45$  - коэффициент Стьюдента, который выбирался с учетом доверительной вероятности  $P = 0,95$ , которую применяют при проведении метрологических измерений;

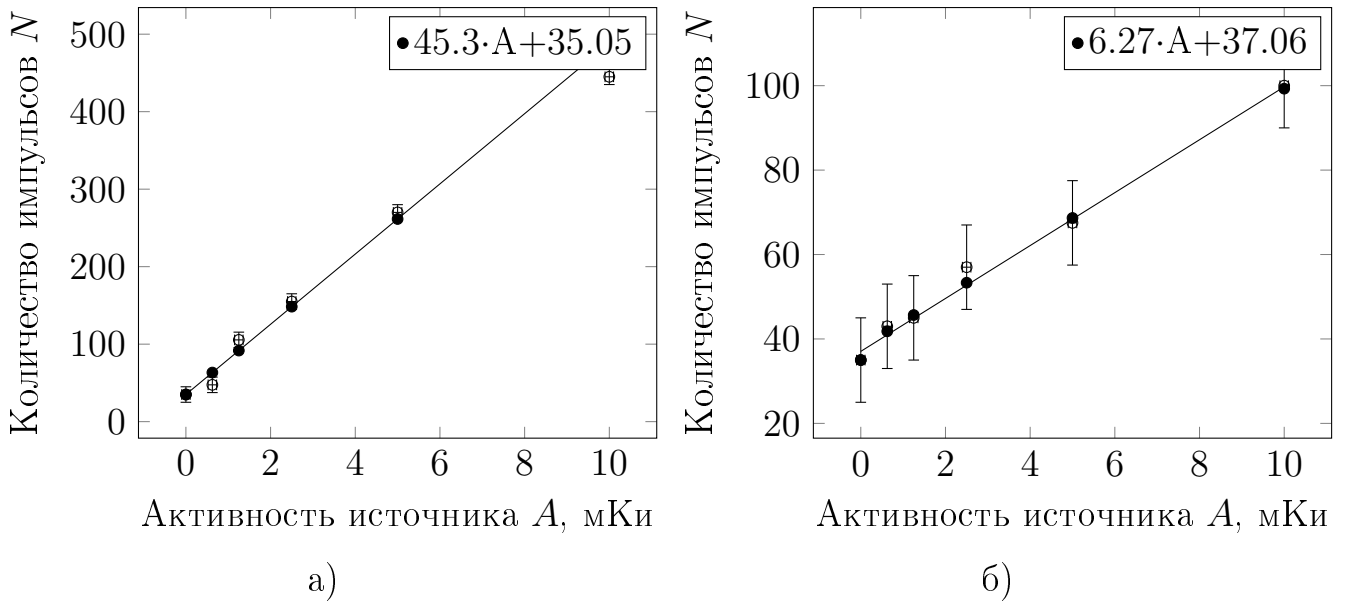


Рисунок 2.11 - Зависимость количества импульсов в единицу времени от активности источников на основе  $^{89}\text{Sr}$  а) и  $^{90}\text{Sr}$  б) (черные круги - расчет, полые круги - эксперимент)

д) неисключенная систематическая погрешность для счетчика фотонов вычислялась следующим образом:

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m \Theta_j^2}, \quad (2.22)$$

где в качестве единственного фактора систематической погрешности рассматривалась скорость темнового счета фотоприемника  $\Theta_1 = 10 \text{ c}^{-1}$ , соответственно  $k = 1$  при  $m = 1$ ;

е) далее проверялось условие:

$$0,8 \leq \Theta/\sigma(\bar{N}) \leq 8,0; \quad (2.23)$$

ж) при  $\Theta/\sigma(\bar{N}) < 0,8$ , принималось  $\Delta = \varepsilon$ , при  $\Theta/\sigma(\bar{x}) > 8,0$ ,  $\Delta = \Theta$ , при выполнении условия 2.23 погрешность результатов измерения вычислялась как:

$$\Delta = K_{\Sigma} \sigma_{\Sigma}, \quad (2.24)$$

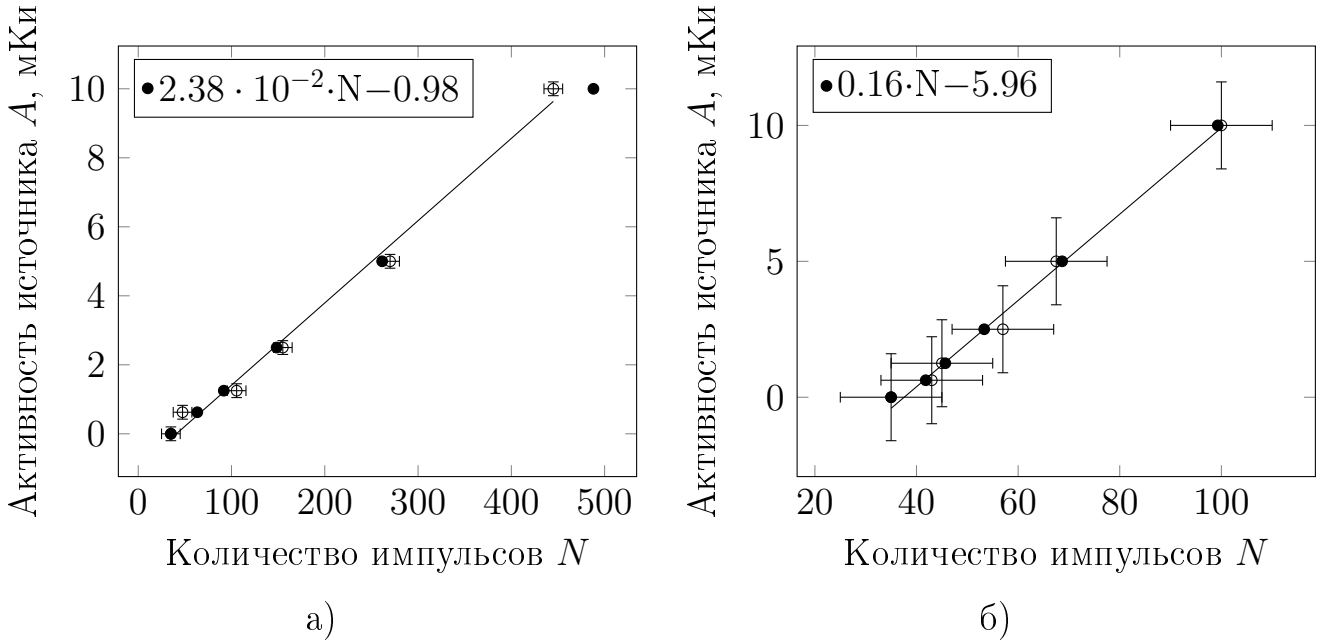


Рисунок 2.12 - Калибровочные зависимости активностей источников на основе  $^{89}\text{Sr}$  а) и  $^{90}\text{Sr}$  б) от количества импульсов, полученных в единицу времени, аппроксимированные линейными функциями (черные круги - расчет, полые круги - эксперимент)

где  $K_\sigma$  - коэффициент, вычисляемый на основе соотношения случайной и неисключенной систематической погрешности,  $\sigma_\Sigma$  - суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения.

$K_\sigma$  вычислялся как:

$$K_\sigma = \frac{\varepsilon + \Theta}{\sigma(\bar{N}) + \sigma(\Theta)}, \quad (2.25)$$

где  $\sigma(\Theta) = \Theta/k\sqrt{3}$ . суммарное среднее квадратическое отклонение вычислялось по формуле:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma^2(\bar{N}) + \sigma^2(\Theta)}. \quad (2.26)$$

- з) погрешность результатов косвенных измерений определения активности источника радиационного излучения для калибровочных функций составила:

$$\Delta_A = \pm \Delta_N \frac{df(N)}{dN}, \quad (2.27)$$

где  $f(N)$  - калибровочная функция для волоконного преобразователя полученная по экспериментальным данным.

## Выводы

Предложена конструкция нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения активности источников радиационного бета-излучения для применения в системах автоматизированного радиационного контроля и управления. Рассмотрена схема включения такого первичного преобразователя в состав системы автоматизированного радиационного контроля и управления. Предложена численная модель для многопараметрического расчета функции отклика первичного оптико-волоконного преобразователя в процессе воздействия излучения радиационных бета-источников. Разработаны структурная схема и блок-схема алгоритм работы программного обеспечения для ее реализации. Экспериментальные исследования показали, что результаты расчетов по предложенной численной модели оптико-волоконного преобразователя для определения активности радиационных бета-источников согласуются с экспериментальными данными, при этом опытный образец указанного оптико-волоконного преобразователя в составе предложенной системы автоматизированного радиационного контроля и управления устойчиво чувствителен к источникам на основе  $^{63}\text{Ni}$  с активностью порядка 20 мКи и выше, а также к источникам на основе  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с активностью порядка 1 мКи. Зависимости скорости счета от активности источников на основе  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{89}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Sr}$  имеют линейный вид.



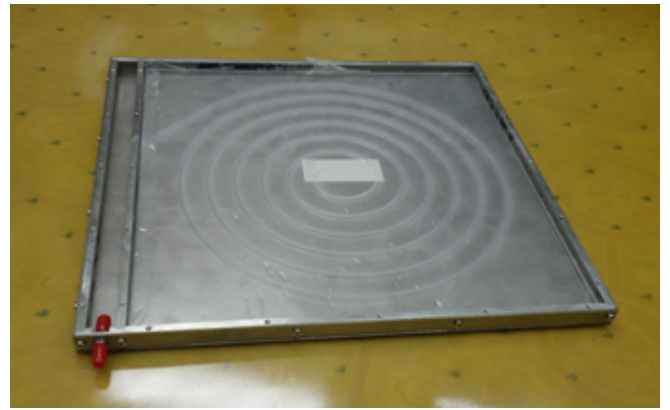
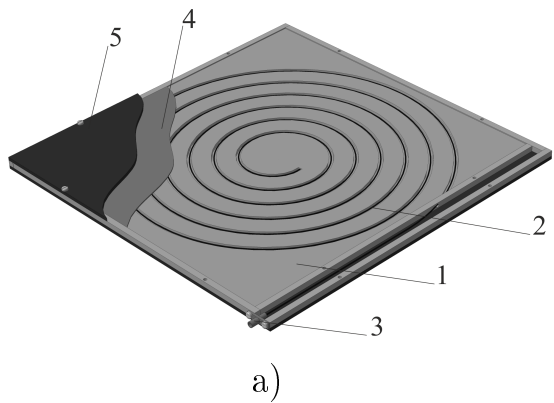
## Глава 3

# **Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма-излучения**

### **3.1. Первичный оптико-волоконный преобразователь для определения мощности дозы гамма-излучения как элемент системы автоматизированного радиационного контроля и управления**

Рассмотрим первичный оптико-волоконный преобразователь для определения мощности дозы гамма-излучения радиационных источников в качестве элемента системы автоматизированного радиационного контроля и управления [39, 207, 177, 214].

На рисунке 3.1 представлена конструкция оптико-волоконного преобразователя. В основе моделируемой конструкции первичного оптико-волоконного преобразователя лежит листовый пластиковый сцинтиллятор, в котором методом лазерной резки сделано спиральное углубление. В канавке заложено спектросмещающее волокно. Лист сцинтиллятора смонтирован в корпус из металла со значительным внутренним отражением [200, 210]. Выход спектросмещающего волокна выведен на оптический коннектор размещенный на корпусе преобразователя, к которому подключается также транспортное волокно в специальной защищенной оболочке для подключения к системе радиационного контроля и управления. Схема включения предлагаемого оптико-волоконного преоб-



а)

б)

Рисунок 3.1 - Конструкция первичного оптико-волоконного преобразователя на основе композиции органического сцинтиллятора и спектросмещающего волокна (а) : 1 - листовой пластиковый сцинтиллятор, 2 - спектросмещающее оптическое волокно 3 - оптический разъем, 4 - зеркало, 5 - корпус, и экспериментальный образец оптического сенсора (б)

зователя 8 в состав системы автоматизированного радиационного контроля и управления.

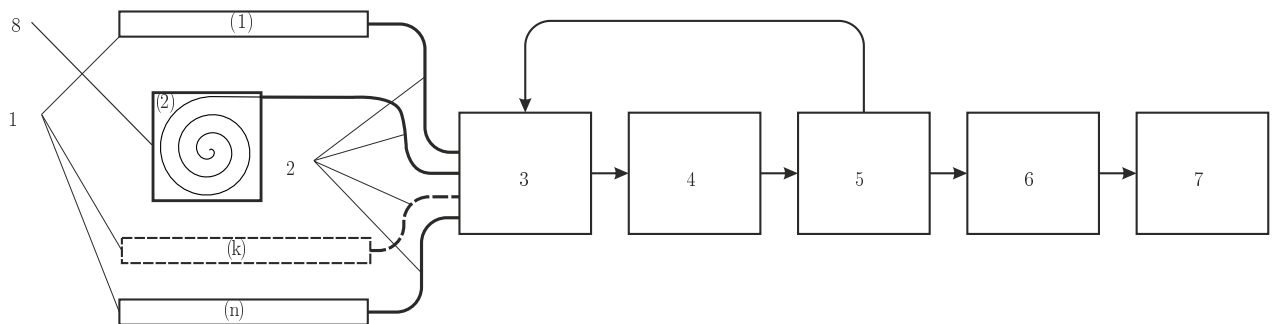


Рисунок 3.2 - Структурная схема системы автоматизированного радиационного контроля и управления с включенным оптико-волоконным преобразователем для измерения мощности дозы гамма-излучения

Под воздействием радиационного излучения в сцинтилляторе генерируются оптические фотоны, которые, попадая в спектросмещающее волокно, возбуждают переизлучение в спектросмещающем волокне с набором длин волн, согласованным со спектром чувствительности счетчика фотонов, установленного в системе радиационного контроля и управления. Количество оптических фотонов на выходе спектросмещающего волокна в единицу времени пропорционально мощности дозы радиационного излучения. Оптический сигнал с оптико-волоконного преобразователя подается на вход счетчика одиночных фото-

нов через многоканальный оптический коммутатор. Количество электрических импульсов на выходе счетчика фотонов совпадает с количеством оптических фотонов на выходе экранированного транспортного волокна и, таким образом, также находится в пропорциональной зависимости от мощности дозы падающего радиационного излучения. Подсчет числа электрических импульсов на выходе счетчика фотонов выполняется микроконтроллерной системой, далее с помощью программного комплекса автоматизированной системы радиационного контроля и управления и калибровочной функции, полученной с использованием специально разработанной численной модели, полученный результат измерения интерпретируется в единицы мощности дозы радиационного излучения.

### **3.2. Численная модель первичного оптико-волоконного преобразователя для детектирования гамма-излучения**

Для оптимизации конструкции оптико-волоконного преобразователя для регистрации мощности дозы радиационного гамма-излучения бы разработана соответствующая численная модель. Модель на первом шаге включает в себя расчет количества оптических фотонов на торце спектросмещающего волокна, на втором - окончательный расчет количества оптических фотонов, достигших фотодетектора. На первом шаге применяется вероятностный подход и метод Монте-Карло в реализации классов Geant4. Модель учитывает следующие взаимодействия: фотоэффект, Комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар, сцинтилляционный эффект, эффекты спектрального смещения, оптического поглощения, оптического отражения и преломления. В процессе моделирования предполагалось, что:

- моделировался однородный радиационный пучок;

- концентрация радиолуминесцентных центров одинакова в каждой точке сцинтиллятора;
- люминесцентные примеси распределены равномерно на всем протяжении спектросмещающего волокна.

Все процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом в Geant4 происходят в конце шага, таким образом эти взаимодействия носят дискретный характер и соответствующие процессы реализуются через интерфейсный класс `G4VDiscreteProcess`. Существует множество схожих функций для дискретных электромагнитных процессов и для электромагнитных пакетов, поэтому дополнительные базовые классы были разработаны для обеспечения общих вычислений [66]. Общие вычисления для дискретных электромагнитных процессов выполняются с помощью `G4VEmProcess` класса. Производные классы выполняют инициализацию отдельных процессов. Физические модели реализуются посредством `G4VEmModel`-интерфейса. Каждый процесс может иметь или несколько моделей, установленных для различных энергетических диапазонов и областей `G4Regions`. Модели выполняют вычисление сечения взаимодействия и выборку конечного состояния. Список электромагнитных процессов и модели для падающего гамма-излучения показан в таблице.

Упругое рассеяние гамма-квантов может включать Рэлеевское, Томсоновское рассеяние. Процесс Рэлеевского рассеяния в Geant4 может быть симулирован с помощью моделей `Penelope` и `Livermore`. Более детальная модель, включающая атомные и молекулярные взаимодействия содержится в `JAЕА` модели. Эти специфические реализации описаны более детально ниже.

Полное сечение для Рэлеевского рассеяния определяется из библиотек в соответствии с 2.1. Угол когерентного рассеяния фотона  $\theta$  выбирается из формулы Рэля -  $(1 + \cos^2 \theta) \sin \theta$  с учетом форм-фактора Хуббеля  $FF^2(q)$  [78, 34].

$$\Phi(E, \theta) = [1 + \cos^2 \theta] \sin \theta \times FF^2(q), \quad (3.1)$$

где  $q = 2E \sin(\theta/2)$  - перенос импульса. Применение форм-фактора помогает учесть в распределении зависимость от начальной энергии  $E$  фотона, которая приобретает значение при в области высоких энергий. Для эффективной выборки конечного состояния применяется метод, предложенный в работе [34], данные о форм-факторах установлены и установленные параметры включены в `G4LivermoreRayleighModel`. Алгоритм выборки выглядит следующим образом:

- а) случайно выбирается атом в соответствии с сечением;
- б)  $\cos\theta$  выбирается как предложено в [34];
- в) азимутальный угол выбирается равномерно.

Фотоэффект - испускание электрона при поглощении фотона в веществе. В стандартной модели `G4PEEffectFluoModel` этот эффект симулируется с использованием параметризованного сечения поглощения фотона, чтобы определить среднюю длину свободного пробега, энергию и направление движения испускаемого электрона.

Параметризация сечения фотопоглощения, предложенная Бигсом (Biggs) используется [28]:

$$\sigma(Z, E_\gamma) = \frac{a(Z, E_\gamma)}{E_\gamma} + \frac{b(Z, E_\gamma)}{E_\gamma^2} + \frac{c(Z, E_\gamma)}{E_\gamma^3} + \frac{d(Z, E_\gamma)}{E_\gamma^4}. \quad (3.2)$$

С помощью метода наименьших квадратов производится подбор каждого из коэффициентов  $a, b, c, d$  согласно экспериментальным данным в нескольких энергетических интервалах [80]. Как правило, границы этих интервалов совпадают с соответствующими интервалами фотопоглощения. Сечение, и, соответственно, средняя длина свободного пробега прерывисты и могут быть вычислены «на лету» из 3.2. Коэффициенты определяются для каждого энергетического интервала из таблицы, разработанной в лаборатории Сандия (Sandia).

Если энергия фотона ниже наименьшего значения по данным от Сандия для материала сечение вычисляется для наименьшей энергии, таким образом

гамма-квант поглощается при любой энергии. Такой подход применяется последовательно для моделей фотоэлектрического эффекта в Geant4. Как результат, любая среда становится непрозрачной для низкоэнергетического гамма-излучения.

Класс G4StaticSandiaData.hh содержит скорректированную таблицу для расчета сечения, составленную из таблицы, предоставленной Сандиа (Sandia) с дополнительными данными взятыми из доклада Лебедева. Коэффициенты взяты из [13].

Комптоновское рассеяние - это неупругое рассеяние гамма-фотонов на атоме с испусканием электрона. В стандартном субпакете доступны две модели: G4KleinNishinaCompton и G4KleinNishinaModel. Первая модель быстрее по скорости расчета, во второй модели учитываются оболочечные эффекты. При симуляции Комптоновского рассеяния на атомно электроне, используется эмпирическое сечение, которое воспроизводит сечение для энергий до 10 кэВ:

$$\sigma(Z, E_\gamma) = \left[ \frac{\log(1 + 2X)}{X} + \frac{P_2(Z) + P_3(Z)X + P_4(Z)X^2}{1 + aX + bX^2 + cX^3} \right], \quad (3.3)$$

где  $Z$  - атомный номер материала среды;

$E_\gamma$  - энергия падающего фотона;

$X = E_\gamma/mc^2$ ;

$m$  - масса электрона;

$P_i(z) = Z(d_i + e_i Z + f_i Z^2)$  При этом стандартное полное сечение на атом для образования электрон-позитронных пар в Geant4 [77]:

$$\sigma(Z, E_\gamma) = Z(Z + 1) \left[ F_1(X) + F_2(X)Z + \frac{F_3(X)}{Z} \right], \quad (3.4)$$

где

$$F_1(x) = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + a_5 X^5, \quad (3.5)$$

$$F_2(x) = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4 + b_5X^5, \quad (3.6)$$

$$F_3(x) = c_0 + c_1X + c_2X^2 + c_3X^3 + c_4X^4 + c_5X^5, \quad (3.7)$$

где  $Z$  - атомный номер материала среды,

$E_\gamma$  - энергия падающего фотона,

$$X = \ln(E_\gamma/mc^2),$$

$m$  - масса электрона, параметры  $a_i, b_i, c_i$  - табличные коэффициенты, для различных интервалов энергий. Средняя длина свободного пробега  $\lambda$  фотона в веществе до генерации электрон-позитронной пары выражается следующим образом:

$$\lambda(E_\gamma) = \left( \sum_i n_{ati} \cdot \sigma(Z_i, E_\gamma) \right)^{-1}, \quad (3.8)$$

где  $n_{ati}$  - число атомов на единицу объема для  $i$ -го элемента материала. Оптические фотоны генерируются в случае если заряженная частица перемещается:

- в диэлектрике со скоростью выше порога для генерации Черенковского излучения;
- в сцинтилляционном материале.

Фотон называется оптическим, если его длина волны много больше чем обычное атомное расстояние, например, когда  $\lambda \geq 10$  нм, что соотносится с энергией  $E \leq 100$  эВ. Генерация оптического фотона в НЕР-детекторе происходит в первую очередь из-за:

- Черенковского эффекта;
- сцинтилляционного эффекта.

Оптические фотоны участвуют в трех видах взаимодействий:

- упругое рассеяние;
- поглощение;
- граничные взаимодействия.

Упругое рассеяние не оказывает важного влияния на оптические фотоны. Поглощение имеет важное значение, потому что формирует нижний предел длины волны в диапазоне прозрачности излучателя. Абсорбция конкурирует с фотоионизацией в продуцировании сигнала в детекторе, таким образом оно должна быть учтена.

При попадании оптического фотона на границу двух сред возможно несколько вариантов развития дальнейших событий в зависимости от типа граничных условий. Выделяют следующие типы граничных условий: диэлектрик - диэлектрик, диэлектрик - металл, диэлектрик - черный металл. В зависимости от типа граничных условий могут наблюдаться оптические явления преломления, отражения или поглощения. В случае наличия границы диэлектрик-диэлектрик оптический фотон претерпевает преломление или отражение, диэлектрик-металл - возможно поглощение оптического фотона в металле, обратное отражение в среду диэлектрика или поглощение в металле. Черный металл - это материал с неопределенными свойствами, поведение оптического фотона не определено. Основные параметры, определяющие состояние оптического фотона - это импульс и поляризация. Поляризация оптического фотона определяется как вектор, состоящий из двух компонентов и направленный по нормали к направлению его движения. Поляризацию оптического фотона характеризуют циркулярность и общая фаза. Циркулярность бывает правосторонней и левосторонней. Оптические фотоны, произведенные в результате радиолюминесценции, линейно поляризованы.

Расчет количества фотонов, достигших фотодетектора, для оптико-волоконного преобразователя для регистрации мощности дозы гамма-излучения производится аналогично расчету для оптико-волоконного преобразователя



бета-излучения. Отличие заключается в том, что на первом этапе с использованием методов Монте-Карло траектории произведенных в сцинтилляторе оптических фотонов, затем переизлученных и распространяющихся в спектросмещающем волокне, отслеживаются вплоть до оптического выхода оптоволоконного преобразователя (торца спектросмещающего волокна). Таким образом, остается учесть потери на стыках  $\varepsilon_{tr}$  по формулам 2.13, 2.14, 2.15. А также потери при ослаблении оптического сигнала в волокне по формуле 2.16.

Выражение для общего количества оптических фотонов, достигших фотоприемника с учетом ослабляющих факторов определяется выражением:

$$N_p = \varepsilon_{at} \cdot \varepsilon_{tr} \cdot N_o. \quad (3.9)$$

Принимая во внимание эффективность фотоприемника  $\varphi$  и его темновой фон  $N_d$  выражение для скорости счета фотонов в зависимости от мощности дозы гамма-излучения аналогично 2.18 имеет вид:

$$N_{cf} = \varphi \cdot N_p + N_d. \quad (3.10)$$

### **3.3. Разработка программного обеспечения для реализации численной модели первичного оптоволоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного гамма-излучения**

Для проведения предварительных численных экспериментов с помощью предложенной численной модели для определения мощности дозы источников гамма-излучения было разработано оригинальное программное обеспечение. В качестве инструментария были выбраны библиотеки классов для моделирования процессов взаимодействия радиационного излучения с веществом Geant4.

На рисунке 3.3 приведена архитектура разработанного программного модуля.

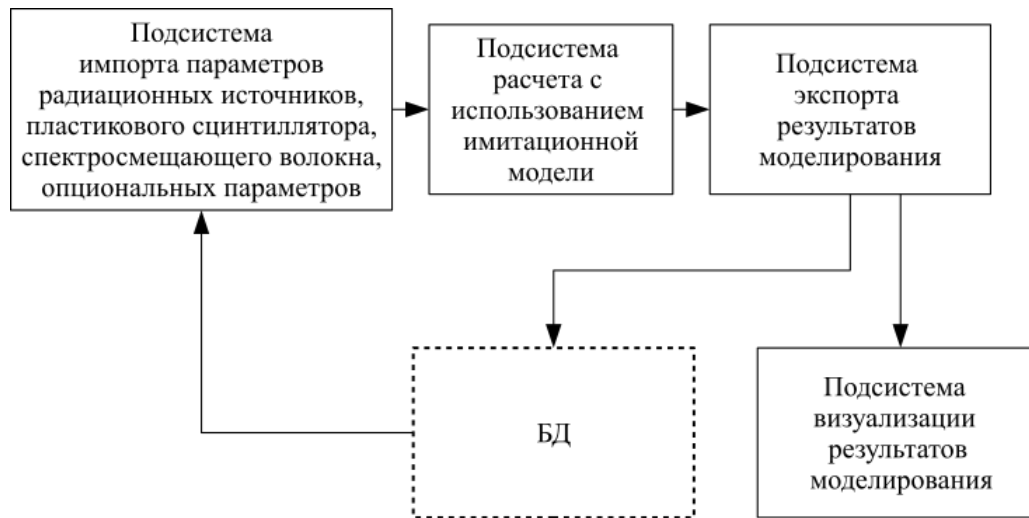


Рисунок 3.3 - Архитектура программного обеспечения для реализации модели опико-волоконного преобразователя

Разработанный программный модуль построен по аналогии с программным модулем, разработанным для реализации численной модели преобразователя для измерения активности радиационных источников:

- а) Программная оболочка, которая включает в себя подсистемы импорта параметров, экспорта результатов моделирования, визуализации результатов моделирования, и предоставляет интерфейс экспорта/импорта данных из базы данных и текстовых файлов, а также программные средства для запуска процесса моделирования и визуализации результатов расчета;
- б) Программное ядро модуля, которое реализуется с использованием библиотеки классов Geant4 [65, 193, 221], на языке высокого уровня C++, для выполнения непосредственно расчета количества оптических фотонов на торце чувствительного волокна, а затем, количества электрических импульсов на выходе счетчик фотонов, а также для нахождения вида калибровочной функции опико-волоконного преобразователя, исходя из заданных начальных условий с использованием предложенной численной модели;

При этом, в отличие от него программный модуль, разработанный для реализации численно модели преобразователя мощности гамма-излучения, позволяет импортировать большой набор входных данных в связи с большей сложностью численной модели оптико-волоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного излучения.

Для разработки ядра программного модуля использовались библиотеки классов Geant4 в связи с преимуществами, описанными ранее в главе 3.

Программный модуль реализует следующие функции:

- импорт параметров радиационных источников: количество, активность, энергетический спектр, геометрическая форма, положение и размеры, направленность излучения в следующих форматах: текстовый файл;
- импорт параметров пластикового сцинтиллятора: геометрическая форма, положение и размеры, сцинтилляционная эффективность, материал, вариант конструкции в следующих форматах: GDML;
- импорт параметров чувствительного волокна: геометрическая форма, положение и размеры, сцинтилляционная эффективность, спектр переизлучения, материал, вариант конструкции в следующих форматах: GDML;
- импорт параметров чувствительного волокна: геометрическая форма, положение и размеры, сцинтилляционная эффективность, спектр переизлучения, материал, вариант конструкции в следующих форматах: GDML;
- импорт опциональных параметров : геометрическая форма и материал корпуса преобразователя, его положение и размеры в формате GDML;
- импорт дополнительных геометрических объектов, необходимых для проведения предварительного численного эксперимента с указанием свойств в следующих форматах: GDML;

- расчет количества оптических фотонов на торце чувствительного волокна;
- расчет количества электрических импульсов на выходе счетчика фотонов;
- нахождение вида калибровочной функции на основе расчетных данных;
- экспорт результатов моделирования в файл или базу данных в следующих форматах: текстовый файл.

Программный модуль в ходе своей работы использует типы входных данных:

- а) файл в формате GDML, содержащий трёхмерное представление модели чувствительного элемента или дополнительного объекта необходимого для симуляции эксперимента, который может быть использован для осуществления моделирования с использованием предложенной модели;
- б) текстовый файл, содержащий набор текстовых директив, пригодных к распознаванию расчетным ядром на базе Geant4, описывающих размеры, активность, энергетические спектры излучения радиационных источников и другие параметры, необходимые для численного моделирования.

Программный модуль в ходе своей работы создаёт следующие типы выходных файлов:

- а) файл в формате CSV, содержащий информацию о значениях скорости счета импульсов при различных активностях источников радиационного излучения.

Программный модуль в ходе своей работы осуществляет запись выходной информации в соответствующие таблицы базы данных. Алгоритмы, применяемые при разработке программного модуля вычисления значений уровня ионизирующего излучения, можно разделить на две группы: алгоритмы, связанные

непосредственно с моделированием (программное ядро), алгоритмы, с помощью которых реализованы функции импорта/экспорта данных (программная оболочка). Программное ядро модуля реализуется в соответствии со следующим алгоритмом:

- а) задается геометрия эксперимента при помощи трехмерных моделей с описанием характеристик используемых материалов, импортируемых из модуля базы данных;
- б) определяются параметры генератора первичных частиц (радиационные источники), регистрируется тип испускаемых генератором частиц с указанием энергетического спектра и углового распределения частиц по направлениям на основе импортируемых данных;
- в) задаются граничные условия для генерации вторичных частиц и моделируемые физические процессы;
- г) задается алгоритм обработки события для извлечения необходимой информации и формат ее вывода для экспорта.

Алгоритм импорта геометрического объекта:

- а) формируется запрос к базе данных на полный список моделей сухого хранилища отработанного ядерного топлива в формате GDML;
- б) выбирается модель с заданной датой создания;
- в) выбранная модель передается на вход расчетного ядра.

Алгоритм импорта конфигурации радиационных источников:

- а) формируется запрос к базе данных на полный список конфигураций радиационных источников, расположенных в сухом хранилище отработанного ядерного топлива в текстовом формате;

- б) выбирается конфигурация с заданной датой создания;
- в) выбранная конфигурация передается на вход расчетного ядра.

Алгоритм экспорта результатов расчета уровня ионизирующего излучения:

- а) файл результатов расчета заносится в базу данных в формате CSV посредством специальной процедуры.

Предложенная реализация модели позволяет проводить оптимизацию конструкции оптико-волоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного излучения с учетом следующих параметров: количество, активность, энергетический спектр и геометрическая форма радиационных источников; геометрическая форма, положение и размеры, сцинтилляционная эффективность, материал, вариант конструкции пластикового сцинтиллятора; геометрия, конструкция, эффективность, спектр переизлучения, спектросмещающего волокна и получать выходные калибровочные функции для использования в составе системы автоматизированного радиационного контроля и управления, а также проводить предварительные численные эксперименты с источниками радиационного излучения, геометрия и материал корпуса преобразователя.

На базе аналогичных принципов, заложенных в предложенной реализации для оптико-волоконного преобразователя, выполнялось компьютерное моделирование взаимодействия рентгеновского и гамма-излучения с радиохромными пленками Gafchromic EBТ3 [215]. Показано, в частности, что наличие в структуре пленки защитных слоев из полиэстера снижает ее чувствительность к ионизирующему излучению приблизительно в полтора-два раза (в зависимости от источника ионизирующего излучения). Таким образом, заявленный подход к реализации численной модели взаимодействия преобразователя с радиационным гамма-излучением является достаточно универсальным.

На рисунках 3.4 и 3.5 представлены алгоритм работы приложения и программный интерфейс соответственно.

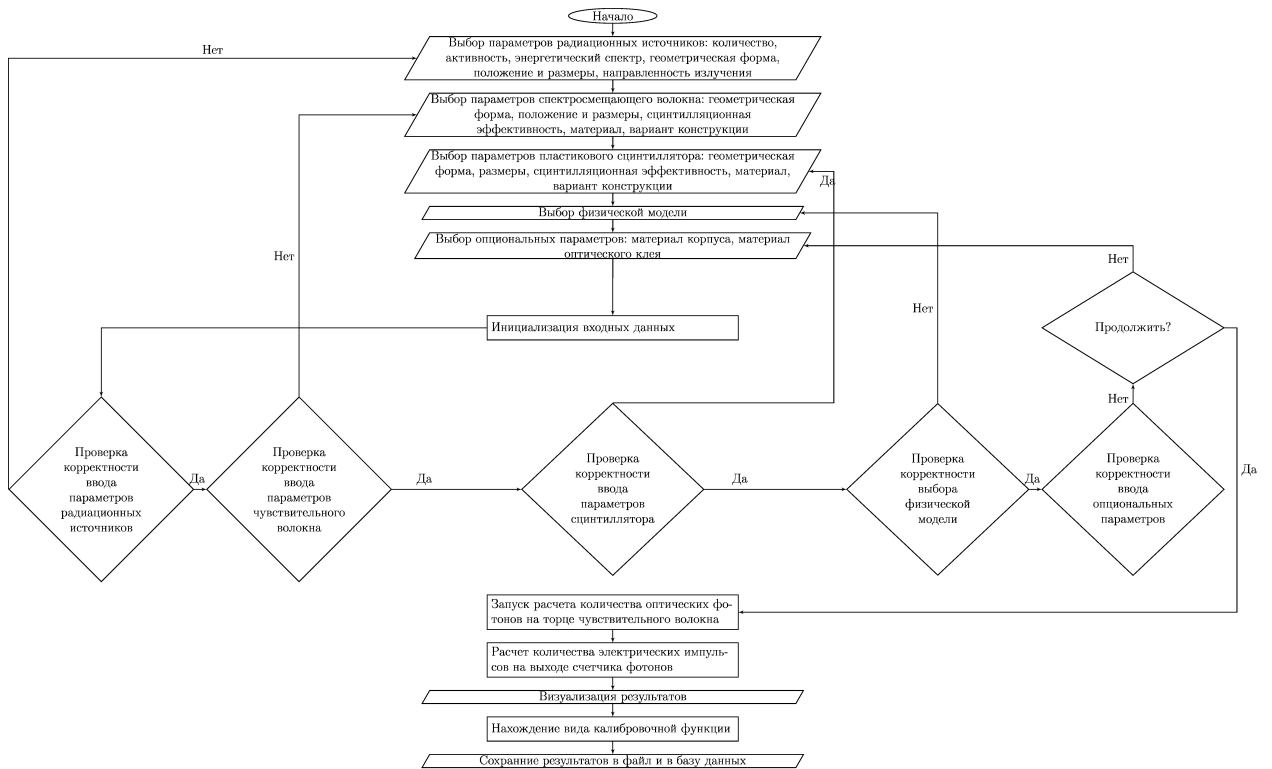


Рисунок 3.4 - Блок-схема алгоритма, используемого при моделировании волоконного преобразователя

Системные программные средства, используемые программой, представлены локализованной версией операционной системы Linux или аналогичной. Прикладные программные средства представлены пакетом для моделирования взаимодействия радиационного излучения с веществом Geant4 версии не ниже 4.10, кроссплатформенной библиотекой Qt версии не ниже 5.5.

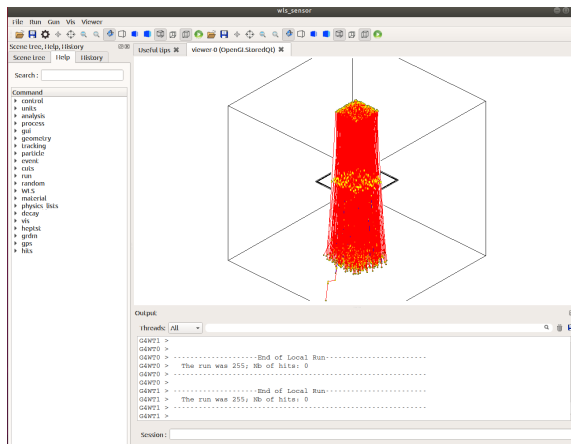


Рисунок 3.5 - Пользовательский интерфейс расчетной программы в процессе моделирования работы оптико-волоконного преобразователя

### 3.4. Экспериментальные исследования образца предложенного оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма-излучения

Для определения наиболее эффективной конструкции оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного излучения были выполнены предварительные расчеты с использованием его разработанной численной модели. В процессе моделирования рассчитывалось количество оптических фотонов на выходе волоконно-оптического преобразователя в зависимости от мощности дозы падающего радиационного излучения, которое затем с учетом оптических потерь, присутствующих при транспортировке оптического сигнала, и эффективности фотодетектора преобразовывалось в количество импульсов на выходе счетчика фотонов, установленного в системе радиационного контроля и управления. На основе полученных расчетных данных для различных вариантов конструкций исследуемого оптико-волоконного преобразователя строились калибровочные зависимости мощности дозы радиационного излучения от количества электрических импульсов на выходе счетчика фотонов, которые аппроксимировались соответствующими калибровочными функциями, на основании которых выбирался самый эффективный вариант конструкции.

Параметры конструкции оптико-волоконного преобразователя, которые применялись при моделировании:

- Радиационные источники - на основе  $^{60}\text{Co}$  и рентгеновского излучения, имитирующие установки Theratron Equinox 100 и Xstrahl 150;
- Спектрсмещающее волокно - ВС-482А (поливинилтолуол);
- Пластиковый сцинтиллятор - ВС-412 (полистирол);
- Светоотражающий материал корпуса - полированный алюминий;



- Геометрическая конфигурация спектросмещающего волокна - количество витков спирали.

Спектры радиационных источников, применявшиеся при моделировании, представлены на рисунке 3.9а) и 3.9б). Спектр радиационного источника на базе  $^{60}\text{Co}$  получен из справочных источников [99], текущее значение активности этого источника заимствовано из паспортных данных с учетом времени распада. Спектр излучения рентгеновской трубки определяется рабочим режимом, установленным напряжением и током, материалом анода и материалом фильтра. В процессе моделирования был рассчитан спектр с использованием следующих параметров: напряжение анода - 140 кВ, ток анода - 12мА, материал фильтра - медь, материал анода - вольфрам.

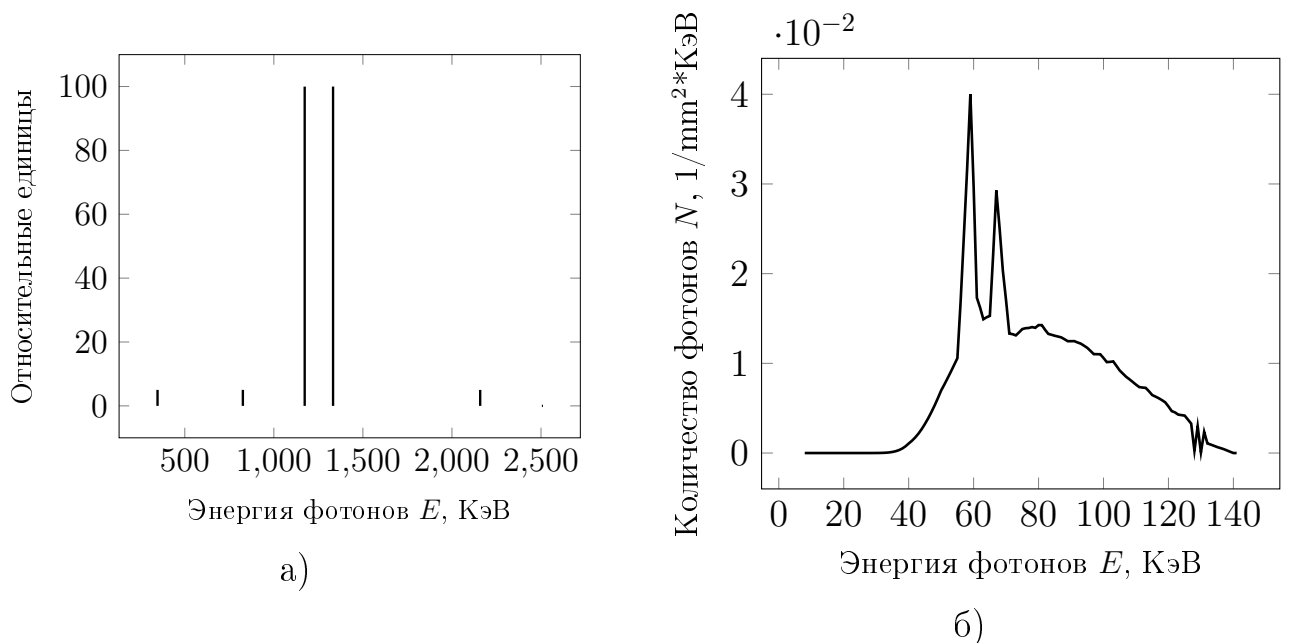


Рисунок 3.6 - Линейчатый спектр излучения радиационного источника на основе  $^{60}\text{Co}$  (а) и спектр излучения рентгеновской трубки (б)

Размеры пучков радиационных источников соответствовали экспериментально возможным значениям: 17x17 см. Величина мощности дозы радиационного излучения при неизменной активности радиационных источников регулировалась за счет добавления в просвет между радиационным источником и оптико-волоконным преобразователем моделей ослабляющих пластин общей

толщиной до 200 мм. В результате моделирования были получены зависимости количеств импульсов в единицу времени от толщины ослабляющего слоя, что эквивалентно зависимости количеств импульсов в единицу времени от мощности дозы. На основании полученных зависимостей строились соответствующие калибровочные функции для всех конструктивных вариантов оптоволоконного преобразователя.

На рисунке 3.8 показаны результаты предварительного моделирования для вариантов конструкций оптоволоконного преобразователя с различным числом витков спиралевидной канавки, в которой уложено спектросмещающее волокно внутри пластикового сцинтиллятора. Моделирование выполнялось для значений мощностей доз в диапазоне 0-5 мГр/с для радиационного источника на базе  $^{60}\text{Co}$ . Рассматривались модели образцов преобразователей с числом витков: 3, 5, 10. Как показано на рисунке, наилучшую чувствительность к гамма-излучению демонстрирует образец с числом витков спирали равным 10. Именно такой вариант конструкции преобразователя был реализован в экспериментальном образце, который далее был подробно экспериментально исследован.

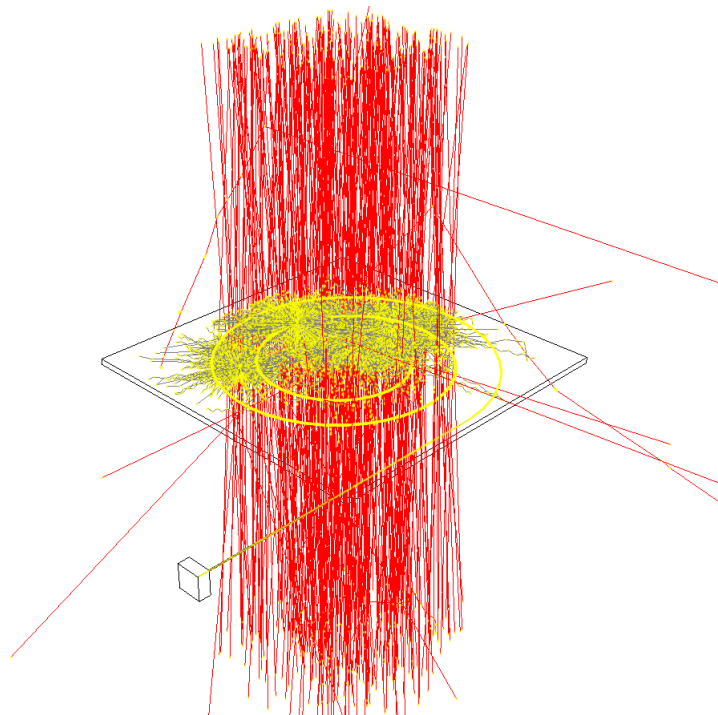


Рисунок 3.7 - Визуализация траекторий частиц в процессе моделирования

На рисунке 3.7 показана визуализация траекторий частиц в процессе моделирования.

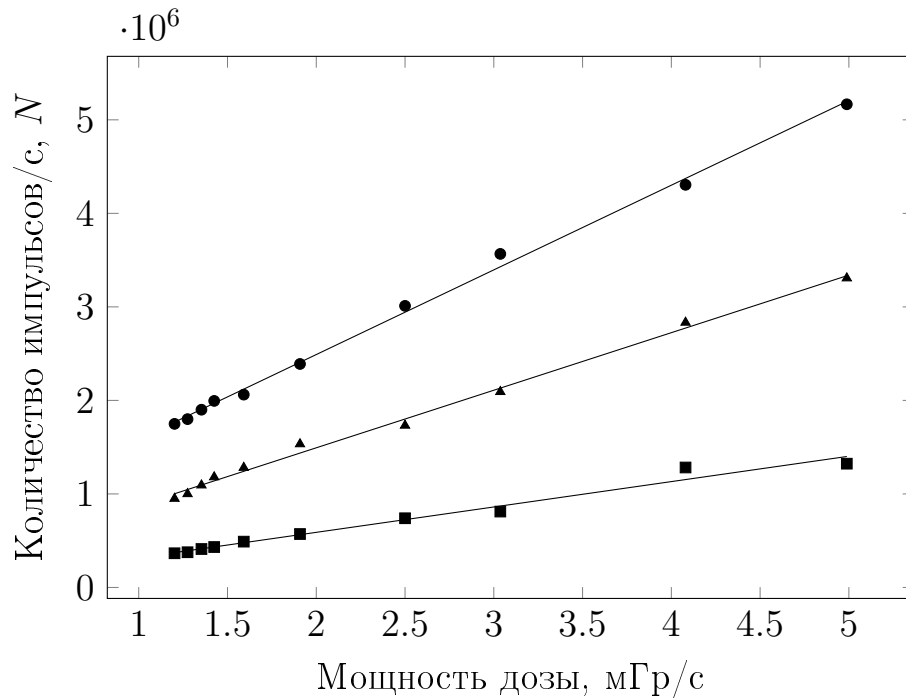


Рисунок 3.8 - Расчетные зависимости количеств импульсов, зарегистрированных в единицу времени от мощности дозы гамма-излучения для трех вариантов конструкций предложенного оптико-волоконного преобразователя с различным количеством витков спирали, по которой уложено спектросмещающее волокно: круги - 10, треугольники - 5, квадраты - 3

Для проведения экспериментальных исследований использовались установки Theratron Equinox 100 и Xstrahl 150. Аппарат Theratron Equinox 100 функционирует следующим образом: внутри аппарата в специальном хранилище находится радиационный источник на основе  $^{60}\text{Co}$ , который в момент начала облучения при помощи специального механизма выдвигается наружу, по завершении облучения радиационный источник задвигается обратно. Доза, выданная аппаратом, лимитируется временем облучения. Аппарат Xstrahl 150 является рентгенотерапевтической установкой, в качестве радиационного источника в которой выступает рентгеновская трубка, доза облучения в этом случае определяется временем работы рентгеновской трубки. Условия проведения экспериментальных исследований соответствовали условиям проведения численного эксперимента. Эксперимент проводился по следующей схеме: датчик поверочного дози-

метра DOSE1 - ионизационная камера FC65-G был помещен в пластину адаптер в поле действия радиационного источника установки Theratron Equinox 100, далее измерялось значение мощности дозы радиационного излучения. Затем поверх пластины-адаптера последовательно накладывались ослабляющие пластины с плотностью твердой воды и так же последовательно повторялись измерения. После чего на место пластины-адаптера помещался образец предложенного оптико-волоконного преобразователя и по аналогичной методике проводились измерения уже количества импульсов в единицу времени на выходе счетчика фотонов в составе системы радиационного контроля и управления, которое пропорционально мощности дозы радиационного излучения. Таким же образом проводились измерения с использованием рентгентерапевтической установки Xtrahl 150 с той лишь разницей, что в качестве поверочного датчика использовалась ионизационная камера TW23342. Для настройки режима работы рентгеновской трубки применялись те же значения анодного тока и напряжения, что и при симуляции эксперимента для получения такого же энергетического спектра излучения. На рисунках 3.9а) и 3.9б) показан процесс экспериментальных исследований образца оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного излучения.

На рисунке 3.10 представлены результаты эксперимента в сравнении с расчетными значениями, полученными с помощью численного моделирования для случаев с  $^{60}\text{Co}$  (а) и рентгеновского излучения (б).

В переходе на единицы мощности дозы была получена зависимость количества импульсов в единицу времени на выходе счетчика фотонов от мощности дозы рентгеновского и гамма-излучения, характеризующая радиационную чувствительность экспериментального образца предложенного оптического волоконного преобразователя в составе системы автоматизированного радиационного контроля и управления в энергетическом диапазоне от 0 до 1,5 МэВ [176, 200, 224] (см. рисунок 3.11). На основе указанной зависимости была определена линейная калибровочная функция, аппроксимирующая зависимость мощ-

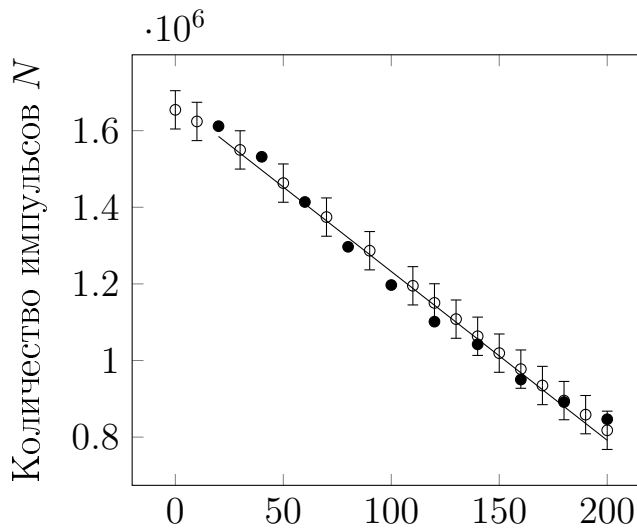


а)



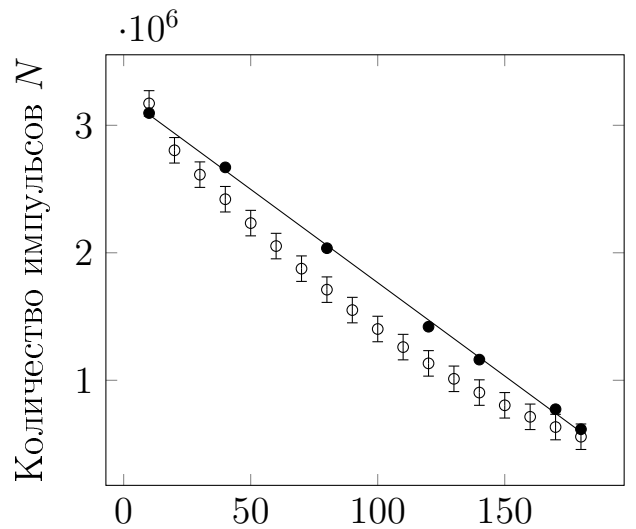
б)

Рисунок 3.9 - Расчетные (круги) и экспериментальные (полые круги) зависимости количества импульсов в единицу времени от толщины ослабляющего слоя для оптико-волоконного преобразователя при облучении с использованием радиационного источника на основе Co-60 (а) и рентгеновской трубки(б)



Толщина ослабляющего слоя  $H$ , мм

а)



Толщина ослабляющего слоя  $H$ , мм

б)

Рисунок 3.10 - Экспериментальные исследования оптического волоконного преобразователя при облучении с использованием радиационного источника на базе Co-60 (а) и рентгеновской установки (б)

ность дозы рентгеновского и гамма-излучений от количества импульсов в единицу времени на выходе счетчика фотонов в диапазоне мощностей доз 1-17 мГр/с.

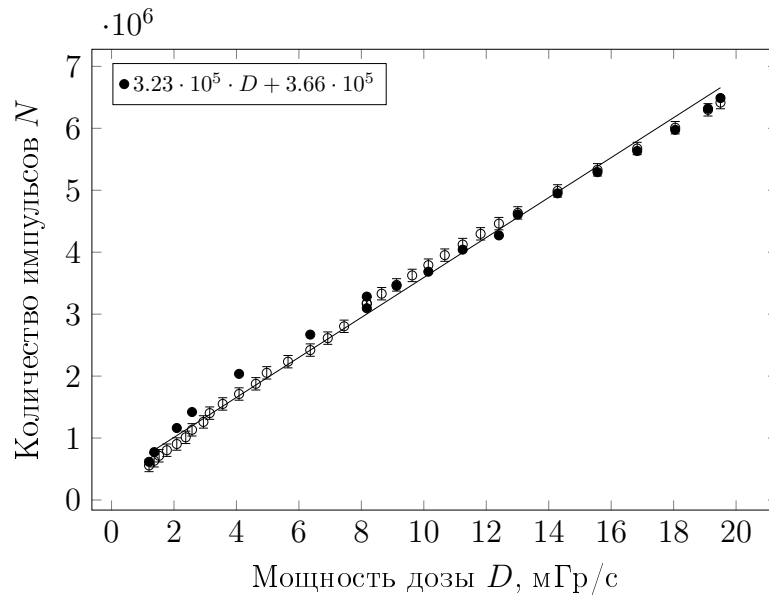


Рисунок 3.11 - Зависимости количества импульсов на выходе счетчика фотонов от мощности дозы рентгеновского и гамма-излучения для образца оптико-волоконного преобразователя

Погрешность результатов прямых измерений скорости счета импульсов рассчитывалась таким же образом как указывалось при описании экспериментальных исследований волоконного преобразователя для регистрации активности радиационных источников в главе 3.

Погрешность результатов косвенных измерений определения мощности дозы радиационного излучения для калибровочной функции составила:

$$\Delta_D = \pm \Delta_N \frac{df(N)}{dN}, \quad (3.11)$$

где  $f(x)$  - калибровочная функция для волоконного преобразователя, полученная по экспериментальным данным.

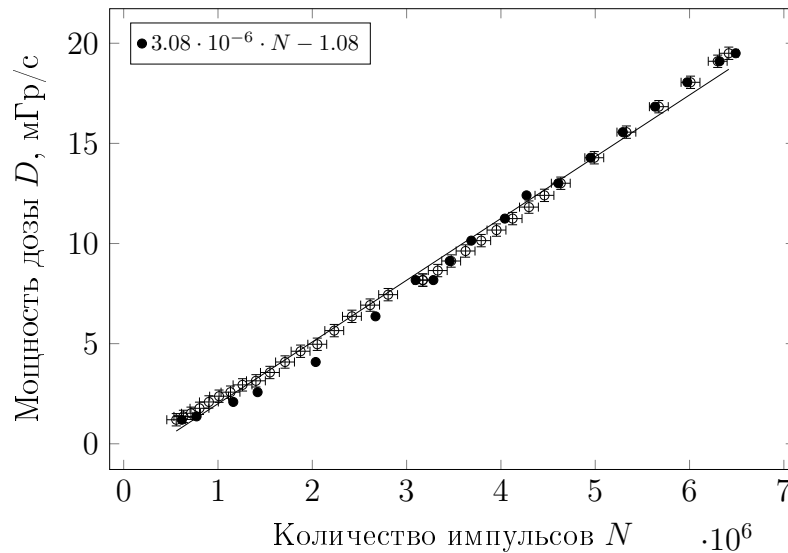


Рисунок 3.12 - Калибровочная экспериментальная зависимость мощности дозы рентгеновского и гамма-излучения от количества импульсов в единицу времени, аппроксимированная линейной функцией (полые круги) и расчетные данные (круги).

## Выводы

Предложена конструкция оптико-волоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного гамма-излучения с использованием органического сцинтиллятора и спектросмещающего волокна. Разработана численная модель взаимодействия такого оптико-волоконного преобразователя с радиационным излучением и описан программный алгоритм для ее реализации. С помощью численной модели, реализованной в расчетной программе, была выполнена оптимизация конструкции оптико-волоконного преобразователя и выбран наиболее эффективный ее вариант, который был реализован в экспериментальном образце. Кроме того, на основе модели определен вид калибровочной функции преобразователя. Калибровочная функция использована в программном обеспечении системы автоматизированного радиационного контроля и управления для интерпретации результатов измерения в единицы мощности дозы радиационного излучения при работе с предложенным оптико-волоконным преобразователем.

Экспериментальные исследования образца оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма- и рентгеновского

излучения показала хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, так, установлена высокая чувствительность оптического датчика к рентгеновскому и гамма-излучениям для энергий до 1,5 МэВ. Для данного сенсора теоретически и экспериментально получена линейная зависимость количества импульсов от мощности дозы гамма- и рентгеновских излучений в диапазоне 1-17 мГр/с.



## Глава 4

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

### **4.1. Первичный оптико-волоконный преобразователь для определения пространственного положения точечного радиационного источника как элемент системы автоматизированного радиационного контроля и управления**

При разработке систем, связанных с управлением технологическими процессами при производстве радиоизотопов и радиофармпрепаратов, часто актуальна задача поиска или отслеживания положения отдельных точечных радиационных источников. В основном такая задача решается для устранения последствий непредвиденных (аварийных) ситуаций при выполнении работ с радиоактивными веществами, когда возникает вероятность локального повышения радиационного фона на одном из участков производственной линии, которое требуется своевременно обнаружить и устранить. В этом случае целесообразно применение оптико-волоконных преобразователей, так как оптико-волоконные волноводы обладают достаточной протяженностью и позволяют охватить обширные площади, при этом скорость развертывания таких преобразователей довольно высока, поэтому при необходимости не составляет трудностей увели-

чить количество оптико-волоконных каналов для съема информации. В источниках приводятся варианты реализации конструкций таких оптико-волоконных преобразователей, основанных на принципе «Time-Of-Flight», когда пространственное положение радиационного источника определяется за счет измерения разности временных промежутков, за которые противоположно направленные оптические фотоны, произведенные одним центром радиолоуминесценции, достигают выходов оптического волокна, которое служит сенсорным элементом. Детекторы (см. Рисунок 1.7), базирующиеся на этом принципе, требуют довольно сложной аналогово-цифровой электронной измерительной части с двумя откалиброванными независимыми каналами съема информации, что повышает их стоимость, требует постоянного контроля параметров для обеспечения необходимого качества проводимых измерений [120, 12, 117]. Альтернативным вариантом конструкции позиционно-чувствительного оптико-волоконного преобразователя, является преобразователь построенный на использовании явления оптического затухания сигнала в волокне. В этом случае координата положения точечного радиационного источника относительно пространственной кривой, проходящей через центр сердцевины оптического волокна на каждом его участке, определяется посредством измерения отношения мощностей оптических сигналов на его выходах. Такой оптико-волоконный преобразователь может быть подключен к системе автоматизированного радиационного контроля и управления в качестве элемента через унифицированный интерфейс.

На рисунке 4.1 предлагается конструктивная схема описываемого оптико-волоконного преобразователя. В основе оптико-волоконного преобразователя - сенсорный элемент из сцинтилляционного волокна 6, помещенный в гибкую непрозрачную оболочку 7 со свойством полного внутреннего отражения, на выходах сцинтилляционного волокна смонтированы оптические коннекторы 8. [182, 179]. Внешняя защитная оболочка 7 с зеркальной поверхностью внутренней стенки необходима для экранирования сенсорного элемента от внешней засветки. Коннекторы 8 предназначены для организации оптического соединения

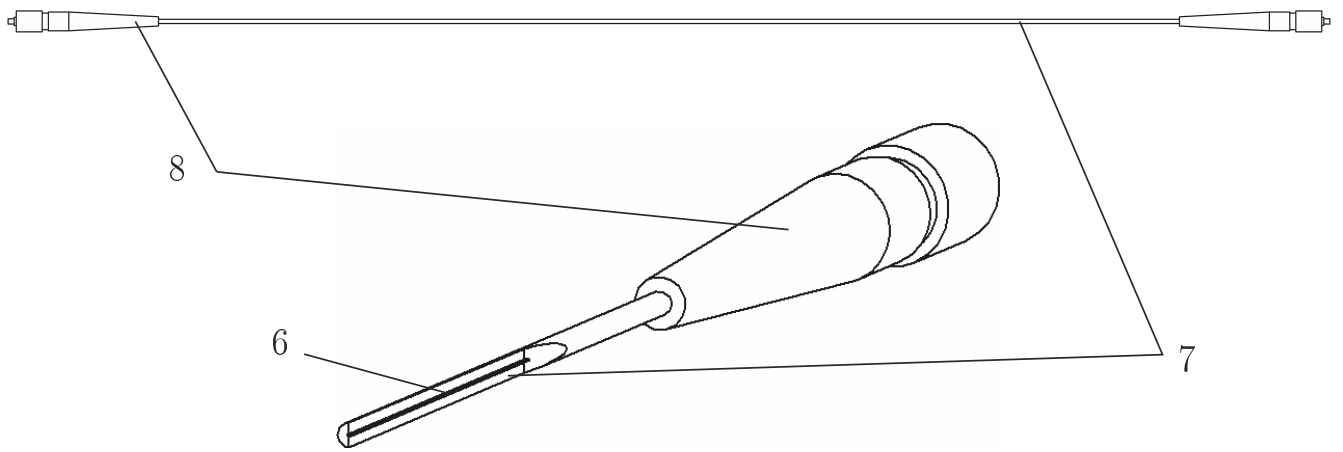


Рисунок 4.1 - Позиционно-чувствительный оптико-волоконный преобразователь

оптико-волоконного преобразователя и интерфейсного блока системы автоматизированного радиационного контроля и управления. Радиационное излучение от точечного бета-источника, падающее на участок сцинтилляционного волокна, возбуждает вспышку радиолоуминесценции на этом участке, пропорциональную количеству поглощенной волокном энергии бета-частиц. Доля произведенного в процессе радиолоуминесценции оптического излучения с длиной волны порядка 550 нм (видимый диапазон) захватывается волокном так, что формируются два направленных к противоположным выходам волокна оптических потока. Мощности оптических сигналов на выходах волокна пропорциональны интенсивности воздействия радиационного излучения на волокно, при этом с учетом наличия явления затухания в волокне становится возможным вычислить участок волокна, на котором происходит взаимодействие и, таким образом, косвенно определить пространственное положение радиационного источника.

Возможная схема включения предлагаемого оптико-волоконного преобразователя 8 для определения пространственного положения источника бета-излучения в состав системы автоматизированного радиационного контроля и управления показана на рисунке 4.2. Оптико-волоконный преобразователь подсоединяется к оптическим интерфейсам многоканального управляемого коммутатора 3. Функция коммутатора заключается в последовательном переключении каналов съема данных и подаче оптического сигнала на входа счетчика фото-

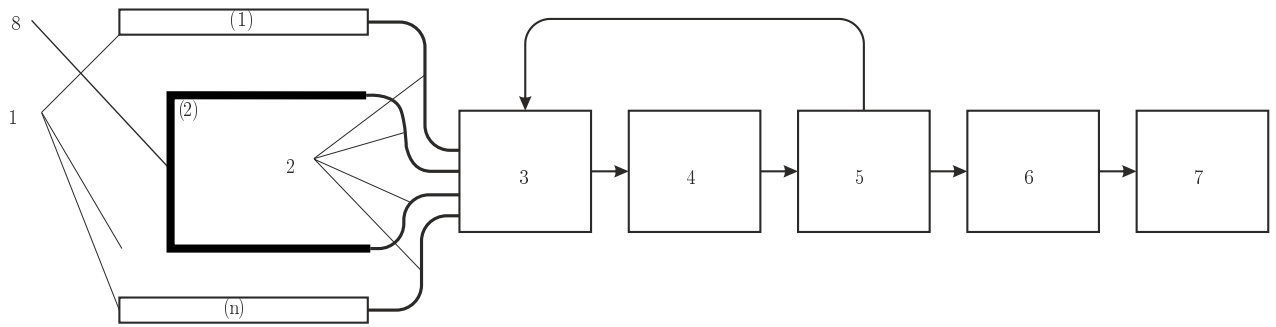


Рисунок 4.2 - Схема включения опτικο-волоконного преобразователя для определения положения точечного радиационного источника в состав системы автоматизированного радиационного контроля и управления

нов, что реализуется с помощью программного обеспечения микроконтроллера 5. При этом режим переключения задается пользователем персонального компьютера 6, а интерпретация измеренных значений мощностей оптических сигналов в единицы координаты радиационного источника выполняется с помощью разработанной специальной математической модели, а точнее, полученной с ее помощью калибровочной функции опτικο-волоконного преобразователя.

## 4.2. Математическое моделирование первичного опτικο-волоконного преобразователя для определения пространственного положения точечного радиационного источника

Затухание - это явление, связанное с поглощением и рассеянием энергии оптического излучения в процессе его распространения в волокне. Затухание характеризуется коэффициентом пропускания, который определяется как:

$$\tau = \frac{P}{P_0}, \quad (4.1)$$

где:  $P$  - мощность оптического сигнала на выходе волокна,  $P_0$  - мощность оптического сигнала на входе волокна.

В случае идеального волновода, коэффициент пропускания эквивалентен 1.

Переходя к логарифмической шкале, определяют коэффициент ослабления  $\beta$  или коэффициент затухания:

$$\beta = -10 \lg \tau = -10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (4.2)$$

Коэффициент затухания измеряется в децибелах. Отнесенный к длине волокна  $L$  коэффициент затухания определяет уже следующую величину, которая называется показателем ослабления.

$$\mu = \frac{\beta}{L}, \quad (4.3)$$

Как правило, значения показателя ослабления приводят в дБ/км, которые на практике для разных волокон варьируются от 0,2 дБ/км и выше.

Закон ослабления интенсивности (мощности) оптического потока излучения в зависимости от длины волокна  $L$  может быть представлен следующим образом:

$$P = P_0 e^{-\mu' L}, \quad (4.4)$$

где  $P_0$  - интенсивность оптического потока на входе однородного волокна и  $\mu' = \mu / 4.3 \cdot 10^3$ . Величина  $\mu'$ , которая измеряется в  $\text{км}^{-1}$ , называется линейным показателем ослабления.

Проведем моделирование работы оптико-волоконного преобразователя для определения пространственного положения точечного радиационного источника на основе сцинтилляционного волокна (Рисунок 4.3). Пусть длина сенсорного элемента равна  $L$ , а радиационный источник взаимодействует с сенсорным элементом на бесконечно малом отрезке в точке  $X$ . Обозначим  $OX = L_1$ ,  $XL = L_2$  и соответствующие им линейные показатели ослабления как  $\mu'_1$  и  $\mu'_2$ .

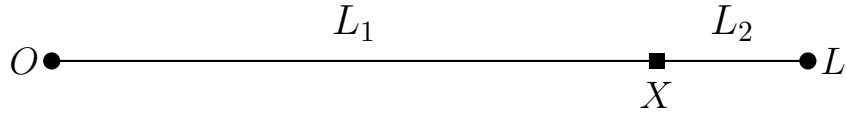


Рисунок 4.3 - Моделирование экспериментальной задачи

Тогда мощности оптических сигналов  $P_1$  и  $P_2$  на выходах волокна могут быть определены как:

$$P_1 = P_0 e^{-\mu'_1 L_1}, \quad (4.5)$$

$$P_2 = P_0 e^{-\mu'_2 L_2}, \quad (4.6)$$

В условиях эксперимента  $P_1$  и  $P_2$  находятся в прямой пропорции от количества оптических фотонов зарегистрированных торцах волокна в единицу времени  $N_1$  и  $N_2$ . Делением выражений 4.5 и 4.6 с последующим логарифмированием найдем:

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \ln \frac{N_1}{N_2} = \mu'_2 L_2 - \mu'_1 L_1 = \mu'_1 L - (\mu'_1 + \mu'_2) L_1 = (\mu'_1 + \mu'_2) L_2 - \mu'_2 L, \quad (4.7)$$

Из 4.7 следует:

$$L_1 = \frac{\mu'_1 L}{\mu'_1 + \mu'_2} - \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{\mu'_1 + \mu'_2}, \quad (4.8)$$

$$L_2 = \frac{\mu'_2 L}{\mu'_1 + \mu'_2} + \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{\mu'_1 + \mu'_2}, \quad (4.9)$$

Как видно, на основе известной экспериментальной зависимости 4.7 становится возможным вычислить  $\mu'_1$  и  $\mu'_2$ , а затем с помощью 4.8 и 4.9 определить координату  $X$  точечного радиационного источника.

Для однородного отрезка сцинтилляционного волокна  $OL$  возможно упрощение:

$$\mu'_1 = \mu'_2 = \mu' \quad (4.10)$$

тогда 4.8 и 4.9 сводятся к:

$$L_1 = \frac{L}{2} - \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{2\mu'}, \quad (4.11)$$

$$L_2 = \frac{L}{2} + \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{2\mu'}. \quad (4.12)$$

Если рассматривать только лишь потери возникающие в сцинтилляционном волокне, значение  $\mu'$  определяется конструктивными особенностями волокна, заложенными производителем, и обычно может быть найдено в открытом доступе, что позволяет определять пространственное положение радиационного источника, исходя исключительно из измеренных отношений мощностей оптических сигналов на выходах преобразователя. Приведенные результаты моделирования находятся в соответствии с результатами расчетов, полученными в [79].

### 4.3. Экспериментальные исследования макета

#### **предложенного оптико-волоконного преобразователя с применением имитации точечного радиационного источника**

В целях проверки работоспособности конструкции и результатов моделирования позиционно-чувствительного волоконного преобразователя было выполнено его макетирование и проведены экспериментальные исследования полученного макета. Конструкция макета предложенного волоконного преобразователя

показана на рисунке 4.4. В пластиковом основании 3 вырезана спиральная канавка, в которую вмонтировано спектросмещающее волокно 2 длиной 5 м. На выходах сцинтилляционного волокна смонтированы оптические разъемы, с помощью которых сенсорный элемент подключается к оптическому коммутатору. Точечный радиационный источник имитируется светодиодом синего свечения, зафиксированным в каретке 4, которая, в свою очередь, может свободно передвигаться по штанге поворотного держателя 3.

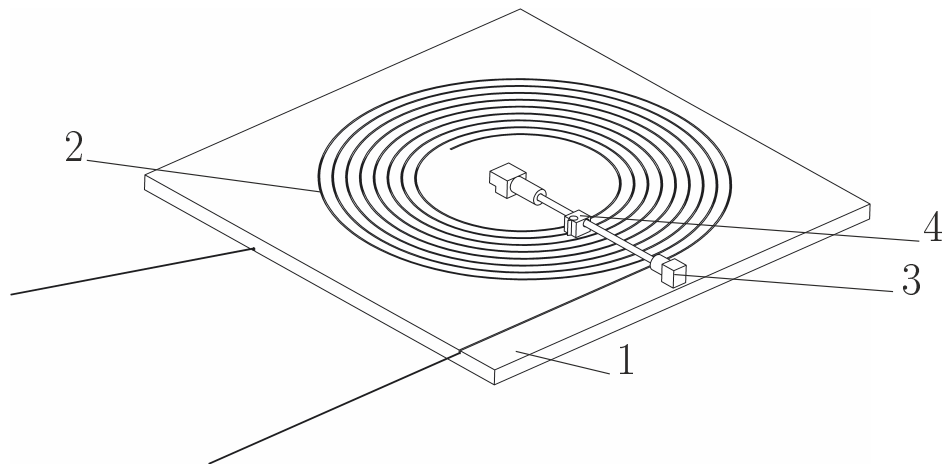


Рисунок 4.4 - Конструкция макета волоконного преобразователя

Методика эксперимента заключалась в следующем: при заданной интенсивности излучения светодиода с одинаковым шагом по всей длине спектросмещающего волокна выполнялся числа фотонов в единицу времени на каждом из его выходов. Измерения проводились с использованием одного счетчика фотонов, на вход которого поочередно подавался сигнал с каждого из выходов спектросмещающего волокна, при этом коммутация осуществлялась с помощью оптического коммутатора, который управлялся программно.

Результаты эксперимента приведены на на рисунках 4.5 и 4.6.

В результате экспериментальных исследований получена калибровочная зависимость координаты точечного радиационного источника  $X$  от логарифма отношения количеств оптических фотонов, зарегистрированных на выходах спектросмещающего волокна, аппроксимированная линейной функцией, пред-



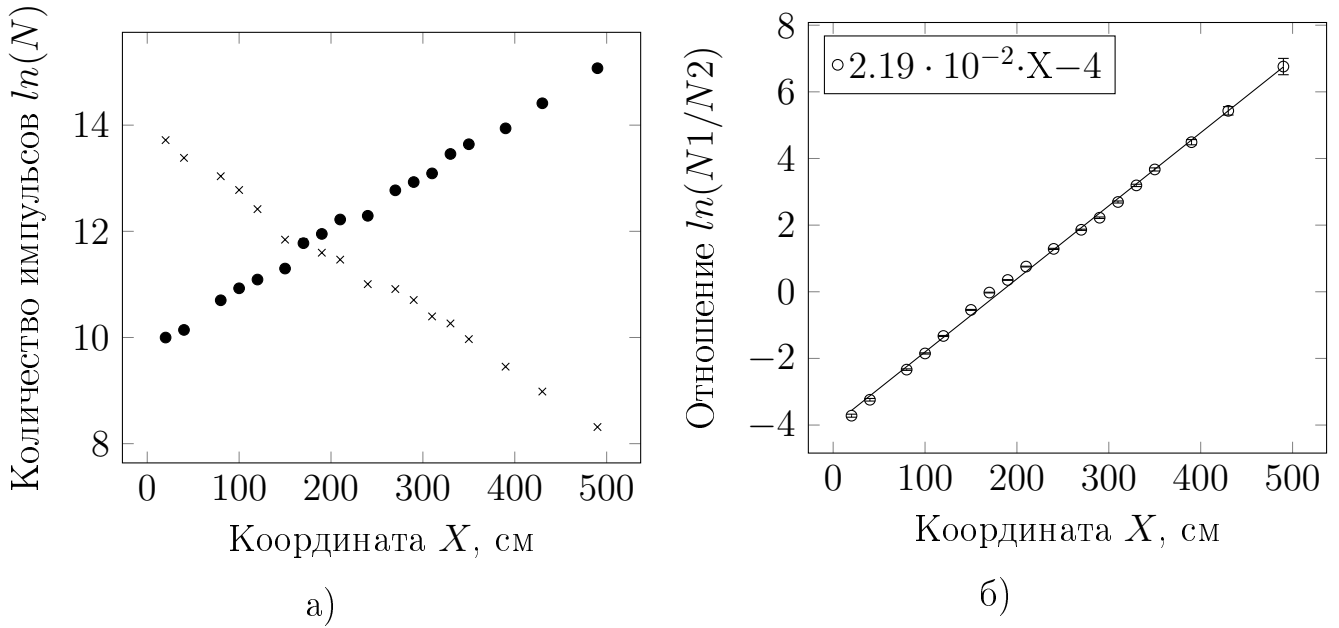


Рисунок 4.5 - Зависимость логарифмов количеств оптических фотонов зарегистрированных в единицу времени на выходах волокна от координаты радиационного источника (а) и зависимость логарифма отношения количеств оптических фотонов на выходах волокна от координаты радиационного источника (б)

ставленная на рисунке 4.6. Очевидно, что вид экспериментально полученной калибровочной функции находится в хорошем соответствии с 4.11.

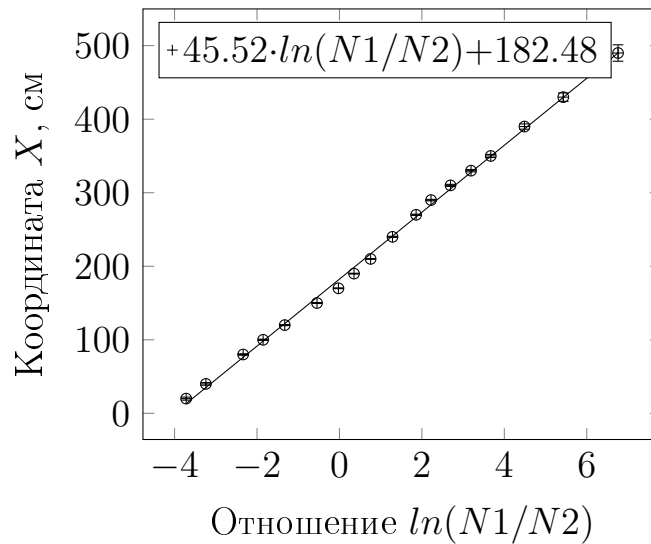


Рисунок 4.6 - Зависимость координаты радиационного источника от количеств оптических фотонов, зарегистрированных в единицу времени на выходах волокна, аппроксимированная линейной калибровочной функцией

Погрешность определения координаты точечного источника радиационного излучения вычислялась в соответствии с методикой определения погрешно-

стей косвенных измерений для функции двух переменных [198]:

$$X = f(N_1, N_2) = \frac{L}{2} - \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{2\mu'}, \quad (4.13)$$

откуда:

$$\begin{aligned} \Delta_X &= \pm \sqrt{\left(\frac{df}{dN_1}\right)^2 \Delta_{N_1}^2 + \left(\frac{df}{dN_2}\right)^2 \Delta_{N_2}^2} = \\ &= \frac{1}{2\mu'} \sqrt{\left(\frac{1}{N_1}\right)^2 \Delta_{N_1}^2 + \left(\frac{1}{N_2}\right)^2 \Delta_{N_2}^2} \quad (4.14) \end{aligned}$$

Установлено, что абсолютная погрешность определения координаты точечного радиационного источника для сенсорного элемента из спектросмещающего волокна длиной 5 м не превышает 10 см.

## Выводы

Разработана конструкция оптико-волоконного преобразователя и способ определения координаты точечного радиационного источника с его использованием. Предложенный оптико-волоконный преобразователь может применяться в качестве элемента системы автоматизированного радиационного контроля и управления. Разработана математическая модель оптико-волоконного преобразователя, которая позволяет интерпретировать результаты измерений количеств оптических фотонов, зарегистрированных на выходах спектросмещающего волокна в единицу времени, в значения координаты радиационного источника, что подтверждается на основании экспериментальных данных. Установлено, что указанная математическая модель с хорошим соответствием экспериментальным данными описывает вид калибровочной функции для такого преобразователя. Показано, что калибровочная функция предложенного преобразователя имеет линейный вид. Проведенные экспериментальные исследования экс-

периментального образца предложенного оптико-волоконного преобразователя в составе системы показали возможность нахождения координаты точечного радиационного источника бета-излучения при длине сенсорного элемента до 5 м.

# **Разработка многоканальной системы радиационного контроля и управления с использованием новых первичных оптико-волоконных преобразователей в качестве элементов системы**

## **5.1. Разработка многоканальной оптико-волоконной системы автоматизированного радиационного контроля и управления**

В данной главе описывается новая многоканальная система автоматизированного радиационного контроля и управления на основе синтеза с использованием первичных оптико-волоконных преобразователей как элементов системы, которая позволяет проводить детектирование мощности дозы излучения, активности и положения радиационных источников различных видов, а также осуществлять управление исполнительными механизмами и устройствами сигнализации.

Структурная схема предлагаемой автоматизированной системы радиационного контроля и управления [192] показана на рисунке 5.2. Система включает  $n$  первичных оптико-волоконных преобразователей 1, оптические сигналы с каждого из них по транспортным волокнам 2 подаются на отдельные входные оптические интерфейсы многоканального оптического коммутатора 3, управление которым осуществляется программным обеспечением, установленным в микроконтроллере 5. Далее выходной сигнал с многоканального оптического коммутатора 3 поступает на входной интерфейс счетчика фотонов 4.

Каждый из оптико-волоконных преобразователей находится под действием источника ионизирующего излучения. Микроконтроллерная система осуществляет вторичное преобразование аналого-цифровое преобразование электрического сигнала со счетчика фотонов - считает количество импульсов в единицу времени. Интерпретация результатов измерения количества импульсов на выходе счетчика фотонов выполняется с использованием специальной численной или математической модели оптико-волоконного преобразователя, а точнее определенной с ее помощью калибровочной функции. При этом управление режимом измерения и визуализация результатов реализуется посредством программного обеспечения, установленного на персональном компьютере пользователя 6.

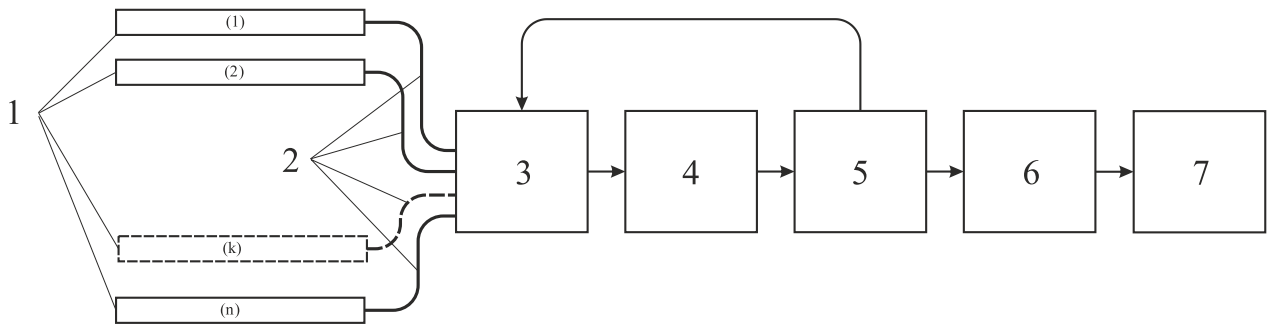


Рисунок 5.1 - Структурная схема системы автоматизированного радиационного контроля и управления

Основным отличительным признаком предложенной системы является возможность подключения волоконно-оптических преобразователей для контроля различных параметров радиационных источников через унифицированный интерфейс, при этом для каждого преобразователя определяется собственная калибровочная функция на основе численной или математической модели. Число подключенных к системе оптико-волоконных преобразователей ограничивается только лишь числом свободных портов коммутатора.

Транспортное оптическое волокно 2 (Рисунок 5.2), выполняет в системе функцию пространственного разделения измерительной системы, расположенной вне зоны действия источников ионизирующих излучений, и сенсорных элементов, находящихся в зоне воздействия радиационных излучений. Исходя из

чего, предлагаемая система позволяет мониторировать радиационную обстановку на достаточно больших расстояниях.

Переключение измерительных каналов выполняется при помощи многоканального оптического коммутатора 3, который подает оптический сигнал с выбранного транспортного волокна, подключенного к входному порту, на входной интерфейс счетчика фотонов и управляется при помощи программных алгоритмов, реализованных в программном обеспечении микроконтроллера 5.

Количество импульсов в единицу времени на выходе счетчика фотонов 4, реализованного на фотодиоде, пропорционально мощности оптического сигнала, поступающего от оптико-волоконного преобразователя. Мощность же оптического сигнала, в свою очередь, находится в прямой зависимости от степени воздействия радиационного излучения на оптико-волоконный преобразователь. Регистрация импульсов на выходе счетчика фотонов за фиксированный промежуток времени выполняется с помощью микроконтроллера 5. Результат измерений передается на персональный компьютер 6, где осуществляется его дальнейшая обработка и интерпретация в единицы измеряемой величины, также есть возможность прямого отображения результата измерения на жидкокристаллическом индикаторе расположенном непосредственно на плате микроконтроллера. С помощью специального программного обеспечения, установленного на персональном компьютере 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 при контроле положения радиационного источника. Микроконтроллерная система (узел микроконтроллера) и фотоприемник (модуль счета фотонов) находятся в корпусе измерительного блока, так что в частном случае, в отсутствие оптического коммутатора система может работать в одноканальном режиме. Вместе

персонального компьютера может быть использован одноплатный компьютер с соответствующим программным обеспечением (Программный модуль 2). В связи с этим вытекает свойство модульности предлагаемой системы радиационного контроля и управления.

Обобщая, следует отметить, что основные преимущества предложенного подхода в том, что система является многоканальной и распределенной, приобретает свойства модульности, универсальности и расширяемости: система может быть сведена к одноканальной исключением из схемы оптического коммутатора 3, и в тоже время функциональные возможности системы могут быть расширены 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. В отличие от оптико-волоконных систем, построенных на брэгговских решетках, использование счета фотонов позволяет исключить влияние температурного режима и внешних деформаций. Применение бриллюэновского рефлектометра также подразумевает сложный анализ поступающих данных и повышает конечную стоимость системы.

## **5.2. Разработка программного обеспечения**

### **оптико-волоконной системы автоматизированного радиационного контроля и управления**

Структурная схема программного комплекса для обеспечения работы предложенной системы автоматизированного радиационного контроля и управления представлена на рисунке 5.2. На рисунке 5.3 представлено аппаратное обеспечение, необходимое для работы разработанного программного комплекса.

Как следует из рисунка 5.2 программный комплекс состоит из 5 независимых программных модулей. Обмен данными между этими модулями осуществ-

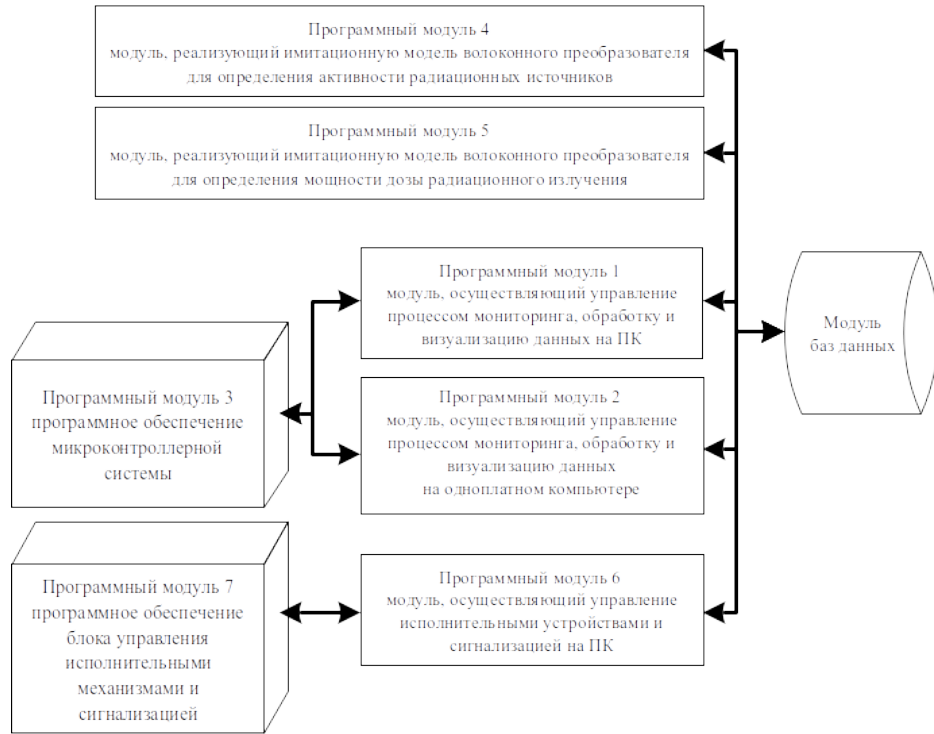


Рисунок 5.2 - Структурная схема программного комплекса системы радиационного контроля и управления

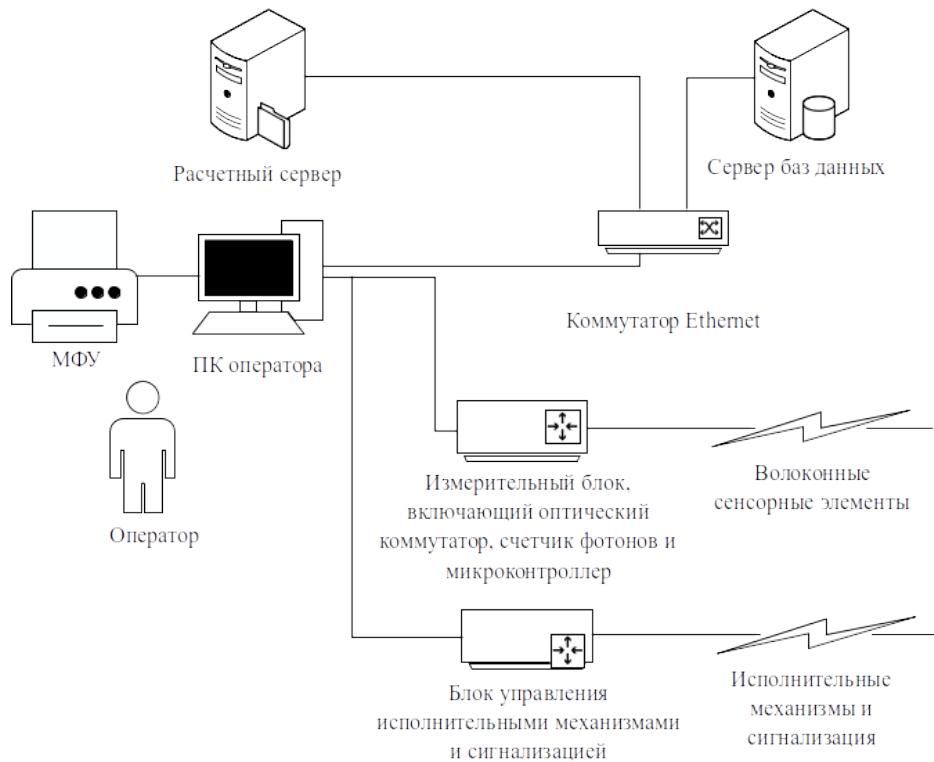


Рисунок 5.3 - Аппаратное обеспечение программного комплекса.



ляется с помощью дополнительного модуля баз данных, построенного на свободно распространяемой СУБД, соответствующей стандартам SQL. Модульность программного комплекса обусловлена модульной природой аппаратной реализации системы автоматизированного радиационного контроля и управления и позволяет обеспечить вариативность ее конфигурирования.

В качестве данных, образующих логические связи между модулями системы, используются:

- результаты измерений, полученные в результате опроса оптико-волоконных преобразователей в единицах активности, мощности дозы или координаты;
- результаты расчетов в соответствии с численными моделями, полученных в программных модулях 1 и 2;
- модели для расчетов (элементов геометрии);
- справочники для расчетов (файлов конфигураций радиационных источников);
- калибровочные файлы оптико-волоконных преобразователей.

На рисунке 5.3 также отражены виды технических средств, обеспечивающие функционирование и взаимодействие программных модулей:

- сервер баз данных;
- расчетный сервер;
- рабочая станция оператора;
- измерительный блок, включающий микроконтроллерную систему;
- многофункциональное устройство (принтер);
- блок управления исполнительными механизмами и сигнализацией;

- оборудование локальной вычислительной сети.

Программные модули 1 и 2 взаимозаменяемы и имеют одинаковые функциональные возможности, различие заключается в том, что Программный модуль 1 устанавливается на персональный компьютер оператора, а Программный модуль 2 предназначен для установки на одноплатный компьютер, который применяется в портативной версии системы автоматизированного радиационного контроля и управления. Указанные модули предназначены для управления процессом мониторинга, интерпретации результатов измерений в терминах активности, мощности дозы и координаты источника, сохранения и экспорта результатов измерения в базу данных в установленном формате, визуализации результатов измерения.

Алгоритм работы программных модулей 1 и 2 представлен на рисунке 5.4

Приведенный алгоритм включает в себя следующие действия:

- инициализация аппаратной части системы автоматизированного радиационного контроля и управления;
- тестирование и диагностика аппаратной части системы автоматизированного радиационного контроля и управления;
- настройка параметров, определяющих режимы мониторинга (выбор вида измерения, выбор каналов измерения, установка периодичности опроса и интервала измерения);
- калибровка оптико-волоконных преобразователей с использованием численных и математических моделей оптико-волоконных преобразователей;
- запуск процесса измерения в единицах скорости счета;
- интерпретация величины скорости счета в единицы измеряемой величины;
- отображение результатов измерения;

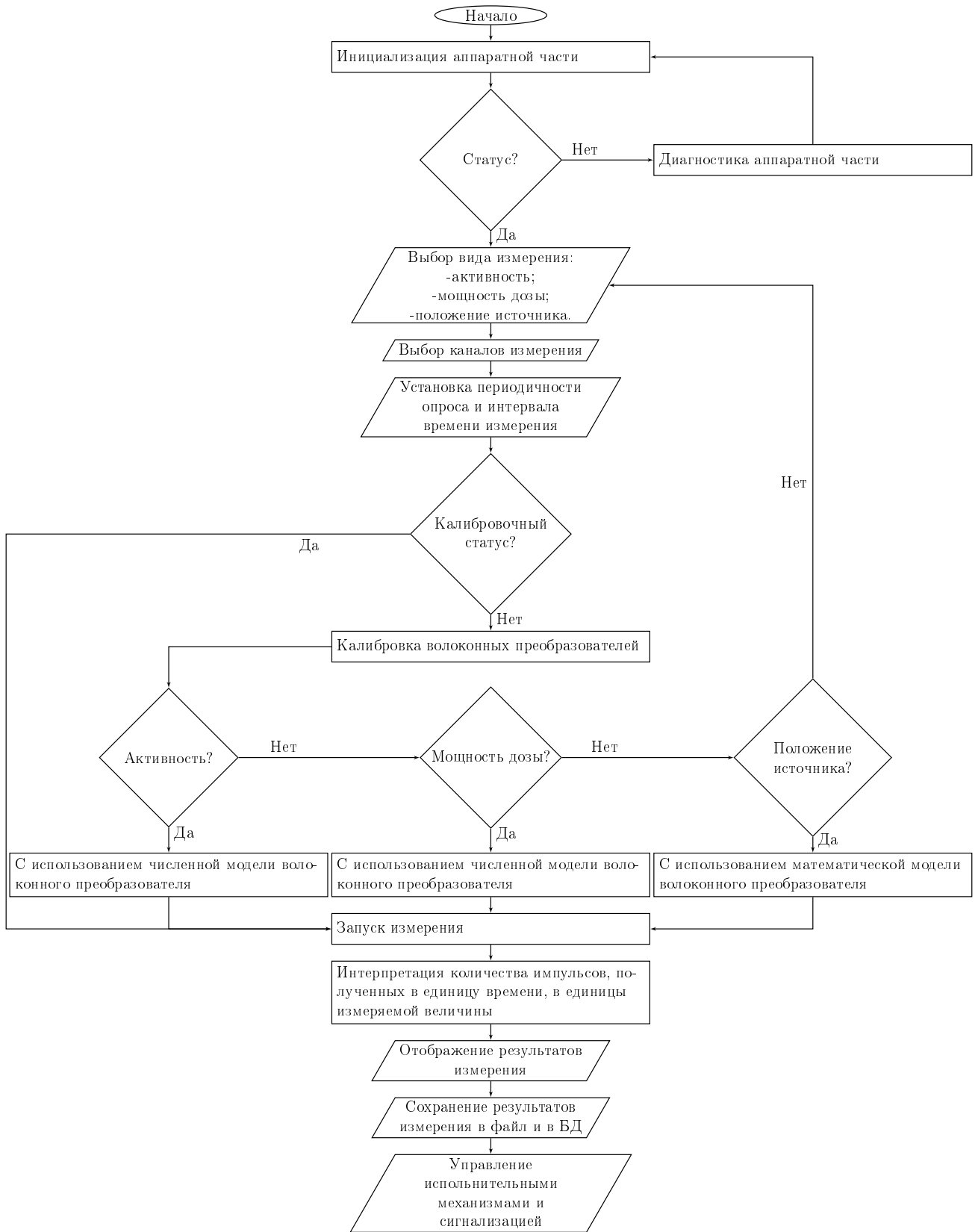


Рисунок 5.4 - Блок-схема алгоритма работы программных модулей 1 и 2

- сохранение результатов измерения в файл и в БД.

При запуске программы запускается инициализация аппаратной части системы автоматизированного радиационного контроля и управления, в случае успешного ее прохождения пользователю предоставляется выбор параметров измерения: измеряемой величины, канала измерения, периодичности опроса преобразователя и интервала времени измерения. При необходимости возможен запуск диагностики аппаратной части. Далее проводится проверка калибровочного статуса выбранных опико-волоконных преобразователей, в случае если работа проводится с вновь подключенным к системе преобразователем проводится его обязательная калибровка с использованием численной или математической модели. Затем происходит запуск процесса измерения мощности оптических сигналов, наведенных источниками радиационного излучения, с последующей интерпретацией результатов измерения в единицы измеряемой величины и их отображением на экране персонального компьютера с последующим сохранением в файл или в базу данных. Далее в ручном или автоматическом режиме вырабатываются решения по управлению исполнительными механизмами и сигнализацией.

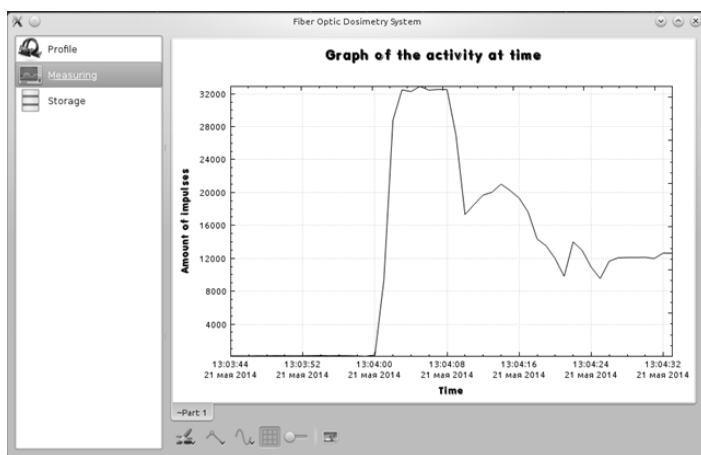
Программные модули 1 и 2 разрабатывались с использованием кроссплатформенного фреймворка Qt. Qt позволяет разрабатывать и компилировать приложения на языке программирования C++ для разных операционных систем без существенных переработок кода. Приложения строились по многопоточному методу, когда графический интерфейс пользователя выносится в отдельный поток, в отдельном потоке находится также часть кода, отвечающая за взаимодействие с измерительным оборудованием. Через графический интерфейс пользователю предоставляется функционал для управления режимом измерений, сигнальными устройствами и исполнительными механизмами, проведения калибровки и диагностики аппаратной части. Обмен информацией между персональным компьютером и микроконтроллером происходит исключительно в

потоке, отвечающем за взаимодействие с аппаратной частью.

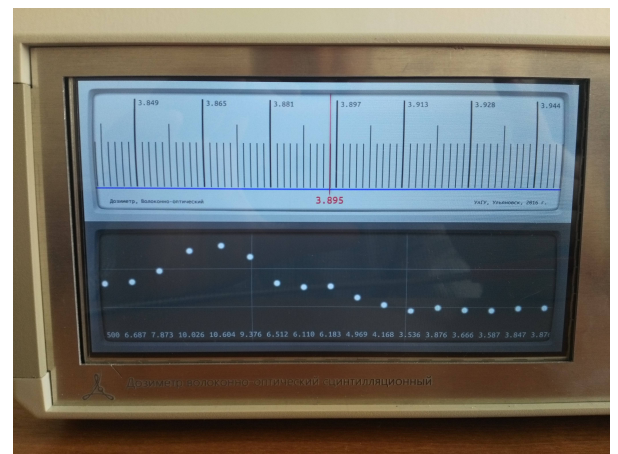
Интерфейс программного обеспечения состоит из следующих компонентов:

- вкладка: «Калибровка». Содержится функционал для проведения калибровок оптико-волоконных преобразователей;
- вкладка: «Диагностика». Содержится диагностический функционал;
- вкладка: «Конфигурация». Настройка параметров измерений;
- вкладка: «Измерения». Строится графическая кривая с данными в зависимости от времени измерения;
- вкладка: «Сохранить». Опции сохранения полученных результатов.
- вкладка: «Сигнализация». Функции управления сигнализацией и исполнительными механизмами.

Интерфейсы программных модулей 1 и 2 показаны на рисунке 5.5:



а)



б)

Рисунок 5.5 - Интерфейсы программных модулей 1 и 2 для ПК (а) и одноплатного компьютера (б)

Программный модуль 3 представляет собой программную "прошивку" ("firmware"), предназначенную для установки в микросхему флеш-памяти

микроконтроллера STM32F100C4T6B (STMicroelectronics) с ARM архитектурой. Микроконтроллер осуществляет управление многоканальным оптическим коммутатором, а также выполняет подсчет импульсов в единицу времени на выходе счетчика фотонов. Основной функционал программного модуля заключается в следующем:

- подсчет количества импульсов зарегистрированных на входе таймера;
- управление таймерами и выдержка постоянных временных интервалов ;
- калькуляция количества импульсов поступающих на вход таймера в единицу времени;
- визуализация полученных данных на экране жидкокристаллического экрана;
- передача полученных данных через внешний последовательный интерфейс на персональный компьютер.

Программный алгоритм работы модуля показан на рисунке 5.6.

Архитектура микроконтроллера STM32F100C4T6B позволяет выполнить измерение количества импульсов в единицу времени аппаратными средствами, задавая режим работы и конфигурацию таймеров. Программно осуществляется только инициализация периферийных устройств - таймеров, их запуск и обнуление по завершению временного промежутка, установленного для измерений. Таймер микроконтроллера включает в себя счетчик, управляющие регистры, некоторое число регистров захвата-сравнения (CAP), регистр автоматического перезапуска, также присутствует предварительный делитель. Для обеспечения необходимой разрядности (32 разряда) применяется пара шестнадцатиразрядных таймеров TIM2 и TIM3. Величина отрезка времени, в течение которого производятся измерения, определяется таймером TIM15, на который вход предварительного делителя которого подаются импульсы с кварцевого резонатора,

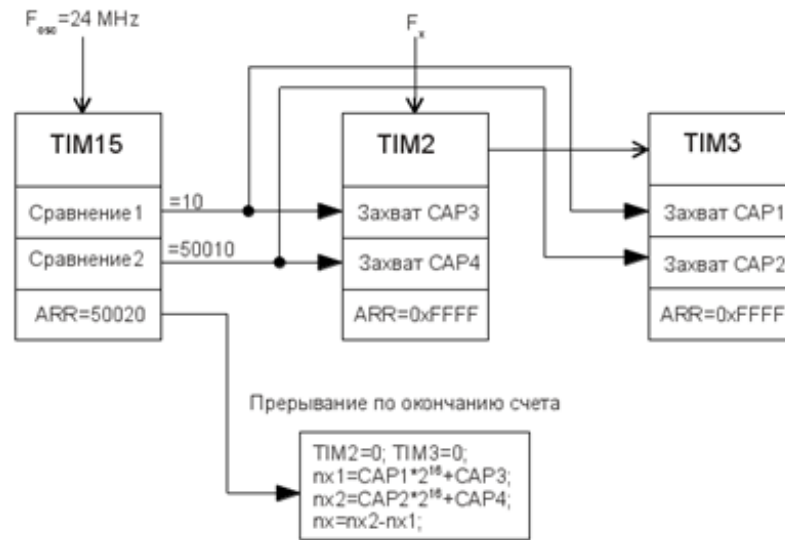


Рисунок 5.6 - Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения микроконтроллера

частота которого составляет 24 МГц. На вход счетчика TIM15 подаются импульсы с частотой уже 50 КГц. После старта таймера TIM15 через некоторое количество зарегистрированных счетчиков импульсов производится считывание цифрового кода из регистров CAP3 и CAP1 таймеров TIM2 и TIM3 соответственно. Затем ровно через 50000 импульсов, накопленных таймером TIM15, что эквивалентно прохождению промежутка времени в 1с, проводится повторное считывание из регистров CAP3 и CAP1, после чего генерируется прерывание, по которому сбрасываются таймеры TIM2, TIM3, TIM15, флаг прерывания, вычисляется измеренное значение количества импульсов за единицу времени, которое выводится на жидкокристаллический экран и передается через последовательный интерфейс UART на персональный компьютер. После чего запускается следующее измерение.

$$nx1 = CAP1 \cdot 2^{16} + CAP3, \quad (5.1)$$

$$nx2 = CAP2 \cdot 2^{16} + CAP4, \quad (5.2)$$

$$Fx = (nx2 - nx1) \cdot 2,0 \cdot Fosc/24,0. \quad (5.3)$$

Узел микроконтроллера может передавать измеренное значение во внешнее устройство, например - персональный компьютер (ПК), через преобразователь интерфейса RS232-USB в документированном текстовом формате. После инициализации микроконтроллера передача данных отсутствует. Существует два режима передачи:

- а) автоматический режим передачи. При этом узел передает данные после каждого измерения. Включается данный режим при поступлении на приемник кода «А» (0x41);
- б) режим передачи по запросу. При этом режиме узел передает одно текущее значение в ответ на каждый запрос. Включается режим и производится однократная передача при поступлении на приемник кода «М» (0x4D). При поступлении на приемник микроконтроллера любого другого символа передача прекращается.

Программное обеспечение микроконтроллера написано на языке С. Для отладки и компиляции программы использовалась среда программирования Eclipse и ARM-GCC, работающая под управлением ОС Linux.

Программные модули 4 и 5 реализуют численные модели оптико-волоконных преобразователей и используются для получения вида их калибровочных функций, а также верификации результатов экспериментальных исследований. Описание алгоритмов работы этих модулей приводится в предыдущих главах диссертации.



### 5.3. Разработка экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и управления на основе первичных оптико-волоконных преобразователей

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны экспериментальные образцы системы автоматизированного радиационного контроля и управления. На рисунках 5.8 и 5.7 показаны экспериментальный образец многоканальной волоконной системы автоматизированного радиационного контроля и управления в стоечном исполнении и экспериментальный образец системы автоматизированного радиационного контроля и управления, выполненный по одноканальной схеме на базе одноплатного компьютера соответственно.



Рисунок 5.7 - Экспериментальный образец системы автоматизированного радиационного контроля и управления в переносной версии

В случае одноканальной версии счетчик фотонов и микроконтроллерная система и управляющий одноплатный компьютер объединены в едином корпусе измерительного блока. Возможно одновременное подключение только одного оптико-волоконного преобразователя.

В случае стоечной версии корпуса компонентов системы автоматизированного радиационного контроля и управления размещаются между монтажными рамами серверной 19” стойки (Рисунок 5.7а). Крепление блоков осуществляется стандартными 19” крепежными комплектами. Размещённые в зоне измерения оптико-волоконные сенсоры подключаются ко входам многоканального оптического коммутатора с помощью защищенных оптических кабелей.

В состав экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и управления в стоечной версии входят (рисунок 5.7а):

- а) оптико-волоконные преобразователи для измерения активности, мощности дозы, координаты источника;
- б) защищенные транспортные оптико-волоконные кабели;
- в) соединительные электрические кабели;
- г) многоканальный оптический коммутатор;
- д) измерительный блок;
- е) персональный компьютер;
- ж) расчетный сервер;
- з) сервер базы данных;
- и) сетевой коммутатор;
- к) источник бесперебойного питания.

Измерительный блок соединяется с многоканальным оптическим коммутатором при помощи стандартного многомодового пачкорда (на рисунке не показан). Для снижения оптических помех через боковую поверхность пачкорда она дополнительно покрыта светонепроницаемой оболочкой.

Внешний вид смонтированной аппаратной части системы автоматизированного радиационного контроля и управления приведен на рисунке 5.8. На рисунке представлена серверная часть системы, которая находится в специализированном помещении-серверной, в котором обеспечиваются требуемые условия по эксплуатации серверного оборудования. Постоянное нахождение оператора в серверной для работы с аппаратурой не требуется.

Автоматизированное рабочее место оператора показано на рисунке 5.9 - персональный компьютер с установленным программным обеспечением. Расположение этого компьютера может быть в любом комфортном для оператора помещении. Соединение управляющего компьютера с серверной частью осуществляется посредством стандартного сетевого пачкорда (витая пара с разъемами RJ-45).

В качестве многоканального оптического коммутатора применено покупное изделие - многомодовый волоконно-оптический коммутатор компании Leoni MOL 1x16 S200 UV/VIS N37 19"FC/PC (позиция 9 на рисунке 5.8). Данный коммутатор характеризуется низкими оптическими потерями, высокой степенью изоляции оптических каналов, широким спектральным диапазоном и малыми временами переключения.

Измерительный блок выполнен в корпусе стандарта 19" высотой 2U (рисунок 5.10). Лицевая панель блока изготовлена из нержавеющей стали методом лазерной резки. На лицевой панели присутствует лишь один входной оптический разъем типа FC счетчика фотонов для подключения выхода оптического коммутатора при помощи многомодового светозащищенного пачкорда.

На задней панели измерительного блока размещены выключатель, разъем для подключения стандартного сетевого электрического кабеля, USB разъем типа B для подключения к персональному компьютеру и разъем RS-232 для соединения с многоканальным оптическим коммутатором. Все кабели для соединений являются стандартными покупными изделиями.

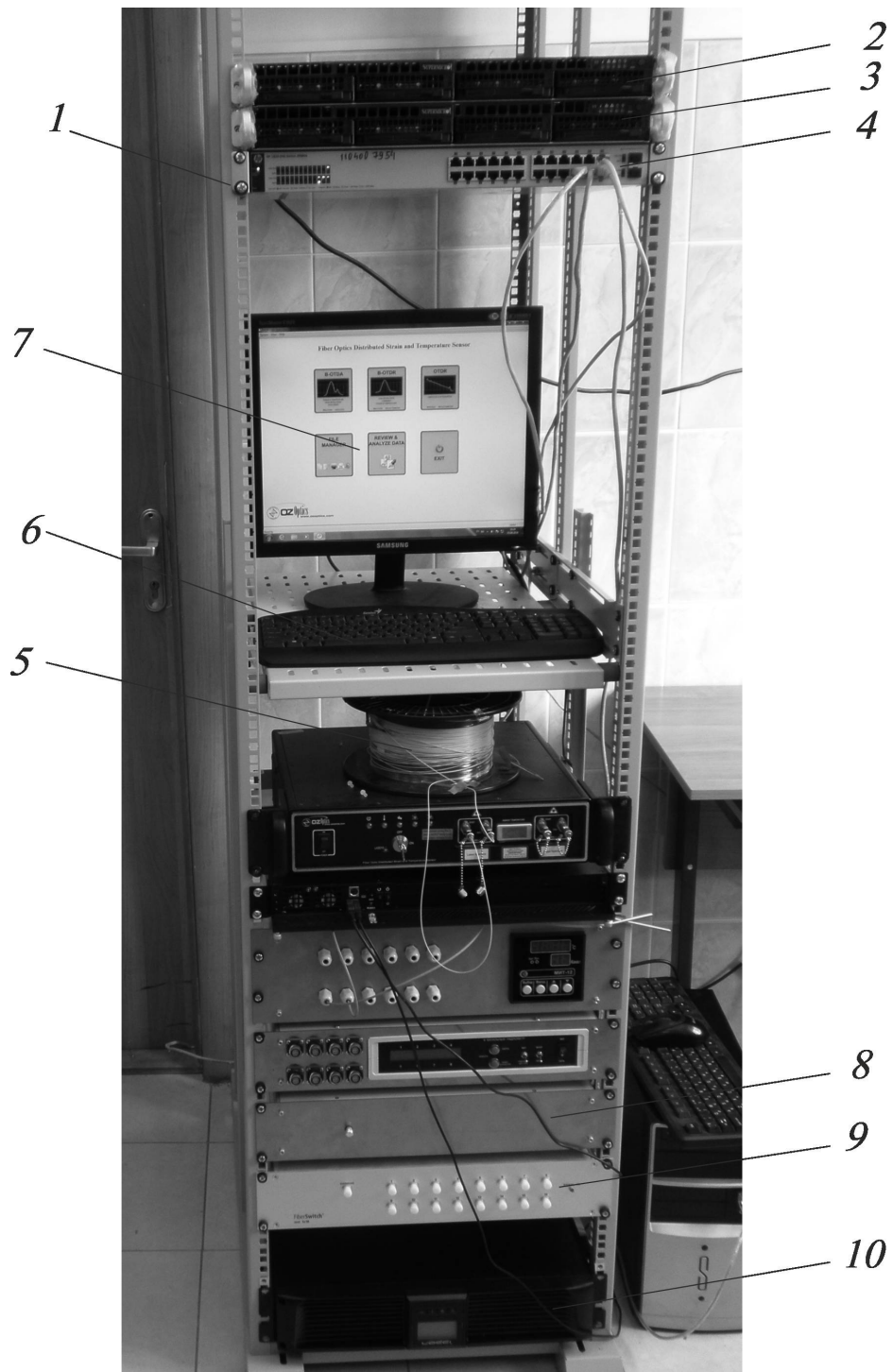


Рисунок 5.8 - Внешний вид аппаратной части экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и управления: 1-инсталляционная стойка; 2-вычислительный сервер; 3- сервер БД; 4-сетевой коммутатор; 5-оптико-волоконный преобразователь; 6-клавиатура; 7-монитор; 8-измерительный блок; 9-многоканальный оптический коммутатор; 10-источник бесперебойного питания

Внутреннее расположение компонентов в блоке измерительном экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и



Рисунок 5.9 - Внешний вид персонального управляющего компьютера в составе системы автоматизированного радиационного контроля и управления



Рисунок 5.10 - Вид спереди измерительного блока экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и управления

управления показано на рисунке 5.11.

Внутри корпуса (5) размещены фотоприемник (счетчик фотонов) COUNT-100В-FC (1), источник питания фотоприемника, источник питания узла микроконтроллера MW PS-25-12 (3) и микроконтроллерная система (4). Для размещения перечисленных устройств внутри корпуса используется монтажные стойки,

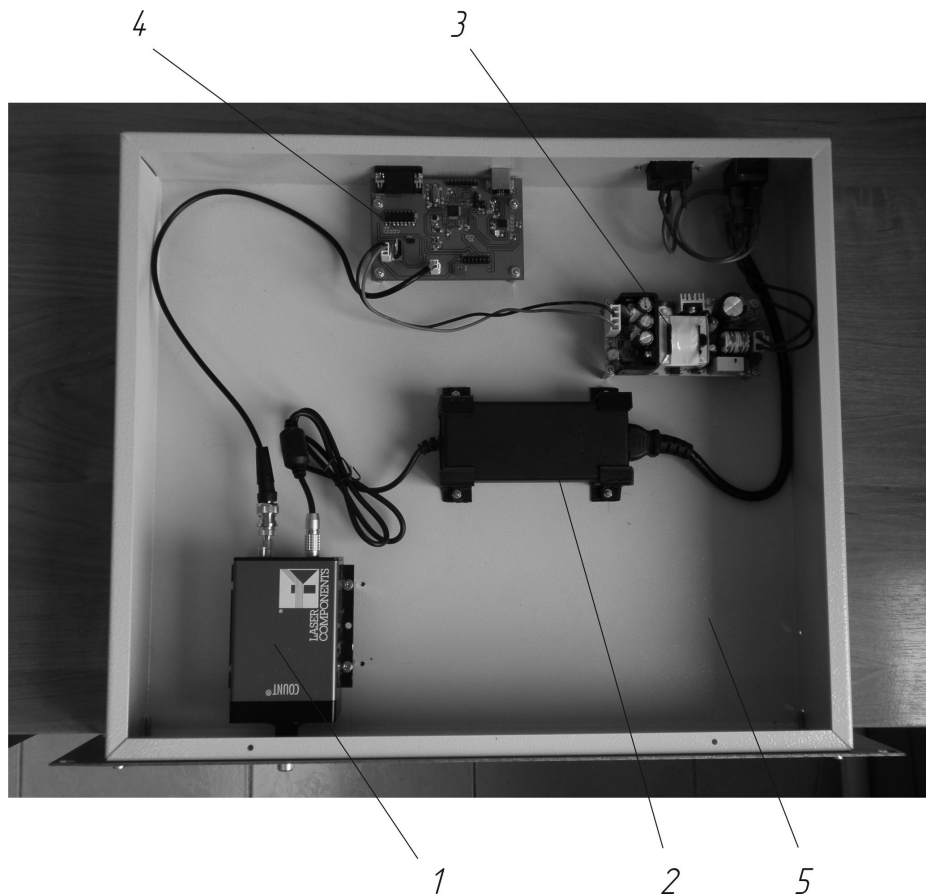


Рисунок 5.11 - Внутреннее расположение компонентов в измерительном блоке экспериментального образца системы автоматизированного радиационного контроля и управления: 1-фотоприемник (счетчик фотонов) COUNT-100B-FC, 2-источник питания фотоприемника, 3-источник питания узла микроконтроллера MW PS-25-12, 4-узел микроконтроллера, 5-корпус

закрепленные на основании корпуса. Входной оптический разъем фотоприемника выведен наружу через отверстие в передней стенке корпуса.

Микроконтроллерная система представляет собой двухслойную печатную плату с расположенными на ней согласно схеме электро-радио-элементами и компонентами и установочными деталями.

Следует отметить, что блок управления исполнительными устройствами отдельно не показан в связи с тем, что его функции ограничены аппаратной коммутацией исполнительных устройств и устройств сигнализации, управляется сигнальными командами отдельного программного модуля (Программный модуль 6) через интерфейс RS-232 и, соответственно, может быть реализован или заменен совместимым готовым изделием в зависимости от конкретного

практического приложения.

Сборка и монтаж образцов выполнены в условиях лаборатории твердотельной электроники НИТИ им С.П. Капицы УлГУ.

## **Выводы**

Разработана новая многоканальная система радиационного контроля и управления с использованием первичных оптико-волоконных преобразователей как элементов системы с возможностями измерения активности радиационного источника, мощности дозы излучения, определения положения радиационного источника, возможностью расширения функционала за счет подключения новых элементов (оптико-волоконных преобразователей). Разработана структурная схема программного комплекса и схема его аппаратного обеспечения. Описан программный алгоритм функционирования системы автоматизированного радиационного контроля и управления, осуществляющий сбор, обработку, верификацию и визуализацию измерительной информации, предусматривающий возможность расширения функционала в случае подключения дополнительных оптико-волоконных преобразователей. Представлены экспериментальные образцы предложенной системы автоматизированного радиационного контроля и управления в стационарной стоечной и портативной версиях.

## Заключение

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  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  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 литературы

1. Annual Report : Rep. / Contract 12084/2008 ; Executor: A. Sporea, D.and Sporea, I. Oproiu, C.and Vata, D. Negut et al. : 2010.
2. Adinolfi M., Angelini C., Antinori F. et al. Application of a scintillating-fibre detector to the study of short-lived particle // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 1991. — Vol. A310. — P. 485–489.
3. Yukihiro E.G., Sawakuchi G.O., Guduru S. et al. Application of the optically stimulated luminescence (OSL) technique in space dosimetry // Radiat. Meas. — 2006. — Vol. 41. — P. 1126 – 1135.
4. Archambault L. Elaboration d'un dosimeter a fibres scintillantes : Ph.D. thesis / L. Archambault ; Faculte des etudes superieures de l'Universite Laval. — 2005.
5. Azmy Yousry, Sartori Enrico. Nuclear computational science: A century in review. — 2010. — 01. — P. 1–470.
6. Goettmann W., Wulf F., Koerfer M., Kuhnenn J. Beam loss position monitor using Cerenkov radiation in optical fibers // Proceedings of the 7th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. — 2005. — P. 301–303.
7. Rudiger F., Koerfer M., Goettmann W. et al. Beam loss position monitoring with optical fibres at DELTA // Proceedings of EPAC 2008. — 2008. — P. 1032–1034.
8. Beddar A.S. Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy // Radiation Measurements. — 2006. — Vol. 41. — P. S124 – S133. — The 2nd Summer School on Solid State Dosimetry: Concepts and Trends in Medical Dosimetry. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448707000108>.
9. Beierholm Anders Ravnsborg. Pulse-resolved radiotherapy dosimetry using fiber-coupled organic scintillators : Ph.D. thesis / Anders Ravns-

- borg Beierholm ; Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. — 2011.
10. Beierholm A.R., Lindvold Lars, Andersen Claus. Organic scintillators with long luminescent lifetimes for radiotherapy dosimetry // Radiation Measurements - RADIAT MEAS. — 2011. — 12. — Vol. 46.
  11. Berghmans F. Ionizing radiation effects on optical components // NATO Advanced Study Institute, Optical Waveguide Sensing & Imaging in Medicine, Environment, Security & Defence. — Gatineau, 2006.
  12. Orrell John L., Aalseth Craig E., Day Anthony R. et al. A Beta-Particle Hodoscope Constructed Using Scintillating Optical Fibers and Position Sensitive Photomultiplier Tubes // Conference: 28th Seismic Research Review. — 2006. — 9.
  13. Analytical approximations for X-ray cross sections 3 : Rep. / Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA) ; chief F. Biggs, R. Lighthill ; Executor: F. Biggs, R. Lighthill : 1988. — 08.
  14. Bisutti J., Girard S., Baggio J. Radiation effects of 14 MeV neutrons on germanosilicate and phosphorus-doped multimode optical fibers // J. Non-Cryst. Solids. — 2007. — Vol. 353. — P. 461–465.
  15. Pat. 6551231 , Scintillator waveguide for sensing radiation : / Bliss Mary, Craig Richard A., Reeder Paul L. ; publ. April.2003.
  16. Brichard B., Fernandez Fernandez. Radiation effects in silica glass optical fibers // Short Course Notebook, New Challenges for Radiation Tolerance Assessment. — Cap d'Agde, 2005. — P. 95–138.
  17. Buruiană Vasile, Oprea Mihaela. A Microcontroller-Based Radiation Monitoring and Warning System // Artificial Intelligence Applications and Innovations / Ed. by Lazaros Iliadis, Ilias Maglogiannis, Harris Papadopoulos et al. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. — P. 380–389.
  18. Byrd J.M., De Santis S., Yin Y. Fiberoptics-based instrumentation for storage ring beam diagnostics // Proceedings of 8th European Workshop on

- Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator. — 2007. — P. 325–327.
19. Cannas M., Lavinia V., Roberto B. Time resolved photoluminescence associated with non-bridging oxygen hole centers in irradiated silica // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 2008. — Vol. B266. — P. 2945–2948.
  20. Chiodini N., Vedda A., Fasoli M., F. Moretti. Ce doped SiO<sub>2</sub> optical fibers for remote radiation sensing and measurement // Proceedings of Fiber Optic Sensors and Applications VI. SPIE Defense and Security. — 2009.
  21. Vedda A., Chiodini N., Di Martino D. et al. Ce<sup>3+</sup>-doped fibers for remote radiation dosimetry // Appl. Phys. Lett. — 2004. — Vol. 85, no. 26. — P. 6356–6358.
  22. Cerenkov P.A. Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics. — Nobel Lecture. — 1958.
  23. Chandrasekhar Subrahmanyan. Radiative transfer. — Courier Corporation, 2013.
  24. Caponero M.A., Baccaro Stefania, Donisi D., Fabbri F. and Pillon M. Characterisation of FBG sensors under ionizing radiation for high energy physics and space physics // Proceedings of the 10th Conference Astroparticles, Particles and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications. — 2007. — P. 533–539.
  25. Jang K.W., Cho D.H., Shin S.H. et al. Characterization of a Scintillating Fiber-optic Dosimeter for Photon Beam Therapy // Opt. Rev. — 2009. — Vol. 16, no. 3. — P. 383–386.
  26. Carrasco P., Jornet N., Jordi O. et al. Characterization of the Exradin W1 scintillator for use in radiotherapy. // Medical physics. — 2015. — Jan. — Vol. 42. — P. 297–304.
  27. Bahrtdt J., Feikes J., Frentrup W. et al. Cherenkov fibers for beam diagnostics at the metrology light source // Proceedings of the 23rd Particle

- Accelerator Conference. — May 2009.
28. Collaboration Geant4. — Physics Reference Manual. Release 10.5, 2019.
  29. Espinosa G., Golzarri J.I., Bogard J., Garcia-Macedo J. Commercial optical fiber as TLD material // Radiat. Prot. Dosim. — 2006. — Vol. 119, no. 1-4. — P. 197–200.
  30. Gusarov A.I., Starodubov D.S., Berghmans F., Deparis O. Comparative study of MGy dose level g-radiation effect on FBGs written in different fibres // OFS-13. — 1999.
  31. Tsuchiya B., Kondo S., Tsurui T. et al. Correlation between radiation-induced defects, and optical properties of pure fused silica-core optical fiber, under gamma-ray irradiation in air at 1273 K // J. Nucl. Mater. — 2011. — Vol. 417, no. 1-3. — P. 810–813.
  32. Crystals Saint-Gobain. Scintillating Optical Fibers. — 2019. — URL: [http://www.crystals.saint-gobain.com/Scintillating\\_Fiber.aspx](http://www.crystals.saint-gobain.com/Scintillating_Fiber.aspx).
  33. Pat. 20130341511 , CsLiLn halide scintillator : / Shah Kanai S., Higgins William M., Van Loef Edgar V. et al. ; publ. December.2013.
  34. Cullen Dermott E. A simple model of photon transport // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 1995. — Vol. 101, no. 4. — P. 499 – 510. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X95004807>.
  35. Lee Bongsoo, Jang Kyoung Won, Cho Dong Hyun, Yoo Wook Jae. Development of one-dimensional fiberoptic radiation sensor for measuring dose distributions of high energy photon beams // Opt. Rev. — 2007. — Vol. 14, no. 5. — P. 351–354.
  36. Andersen C.E., Aznar M.C., Boetter-Jensen L. et al. Development of optical fibre luminescence techniques for real time in vivo dosimetry in radiotherapy // Proceedings of the the International Symposium “Standards and codes of practice in medical radiation dosimetry”. — 2002. — Vol. 2. —

- P. 353–360.
37. Jang K.W., Yoo W.J., Park J., Lee B. Development of scintillation-fiber sensors for measurements of thermal neutrons in mixed Neutron-gamma fields // J. Korean Phys. Soc. — 2010. — Vol. 56, no. 6. — P. 1777–1780.
  38. Fernandez Fernandez A., Brichard B., Berghmans F., Decreton M. Dose-rate dependencies in gamma-irradiated fiber Bragg grating filters // IEEE T. Nucl. Sci. — 2002. — Vol. 49, no. 6. — P. 2874–2878.
  39. Dosimeter : пат. US20160015338A1 US. / Koichi Chida, Masayuki Zuguchi, Masaski Nakamura и др. ; заявл. 2014 ; опубл. 2016.
  40. Gusarov A., Fernandez Fernandez A., Vasiliev S. et al. Effect of gamma-neutron nuclear reactor radiation on the properties of Bragg gratings written in photosensitive Ge-doped optical fiber // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 2002. — Vol. B187. — P. 79–86.
  41. Gusarov A., Chojetzki C., Mckenzie I. et al. Effect of the fiber coating on the radiation sensitivity of type I FBGs // IEEE Photon. Tech. L. — 2008. — Vol. 20, no. 21. — P. 1802–1804.
  42. Calderon A., Martinez-Rivero C., Matorras F., Rodrigo T. Effects of  $\gamma$  and neutron irradiation on the optical absorption of pure silica core single-mode optical fibres from Nufern // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 2006. — Vol. A565. — P. 599–602.
  43. Alasia D., Fernandez Fernandez A., Abrardi L. et al. The effects of gamma-radiation on the properties of Brillouin scattering in standard Ge-doped optical fibres // Meas. Sci. Technol. — 2006. — Vol. 17. — P. 1091–1094.
  44. Eisen Y., Shor A., Mardor I. CdTe and CdZnTe gamma ray detectors for medical and industrial imaging systems // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1999. — Vol. 428, no. 1. — P. 158 – 170. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>

S0168900299000030.

45. Yaakob N.H., Wagiran H., Hossain I. et al. Electron irradiation response on Ge and Al-doped SiO<sup>2</sup> optical fibres // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 2011. — Vol. A637. — P. 185–189.
46. Justus B.L., Falkenstein P., Huston A.L. et al. Elimination of Cerenkov interference in a fibre-optic-coupled radiation dosimeter // Radiat. Prot. Dosim. — 2006. — Vol. 120, no. 1-4. — P. 20–23.
47. Pat. 5714761 , Scintillator apparatus : / Fay Theodore D. ; publ. February.1998.
48. Girard S., Ouerdane Y., Marcandella C. et al. Feasibility of radiation dosimetry with phosphorus-doped optical fibers in the ultraviolet and visible domain // J. Non-Cryst. Solids. — 2011. — Vol. 357. — P. 1871–1874.
49. Fernandez Fernandez A., Brichard A., Berghmans F. In situ measurement of refractive index changes induced by gamma radiation in germanosilicate fibers // IEEE Photonic Tech. L. — 2003. — Vol. 15, no. 10. — P. 1428–1430.
50. Jang K.W., Cho D.H., Yoo W.J. et al. Fiber-optic radiation sensor for detection of tritium // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. — 2011. — Vol. 652(1). — P. 928–931.
51. Maier R. R.J., MacPherson W.N., Barton J.S. et al. Fibre Bragg gratings of type I in SMF-28 and B/Ge fibre and type IIA B/Ge fibre under gamma radiation up to 0.54 MGy // Proceedeidsngs of the 17th International Conference on Optical Fibre Sensors / Ed. by M. Voet, R. Willsch, W. Ecke et al. — Vol. 5855. — 2005. — P. 511–514.
52. Suchowerska N., Lambert J., Nakano T. et al. A fibre optic dosimeter customised for brachytherapy // Radiat. Meas. — 2007. — Vol. 42. — P. 929–932.
53. Henschel H., Koerfer M., Kuhnhen J. et al. Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 2004. — Vol. A526. — P. 537–550.
54. Alessi A., Agnello S., Sporea D.G. et al. Formation of optically active oxygen

- deficient centers in Ge-doped SiO<sub>2</sub> by  $\gamma$ - and  $\beta$ -ray irradiation // *J. Non-Cryst. Solids.* — 2010. — Vol. 356. — P. 275–280.
55. Friebele E.J. Correlation of single mode fiber fabrication factors and radiation response // Naval Research Laboratory Final Report No. NRL/MR/6505-92-6939. — 1991.
56. Furetta C., Weng P. S. Operational Thermoluminescence Dosimetry. — London: World Scientific Publisher, 1998.
57. G. Friedlander, E.S. Macias, J.W. Kennedy. Nuclear and Radiochemistry. — Wiley, 1981.
58. Griscom D.L., Golant K.M., Tomashuk A.L. et al.  $\gamma$ -radiation resistance of aluminum-coated all-silica optical fibers fabricated using different types of silica in the core // *Appl. Phys. Lett.* — 1996. — Vol. 69. — P. 322–324.
59. Lu P., Bao X., Kulkarni N., Brown K. Gamma ray radiation induced visible light absorption in P-doped silica fibers at low dose levels // *Radiat. Meas.* — 1999. — Vol. 30. — P. 725–733.
60. Girard S., Keurinck J., Ouerdane Y. et al.  $\gamma$ -rays and pulsed X-ray radiation responses of germanosilicate single-mode optical fibers: influence of cladding codopants // *J. Lightwave Technol.* — 2004. — Vol. 22, no. 8. — P. 1915 – 1922.
61. Girard S., Keurinck J., Boukenter A., Meunier J.-P. Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-, germanium-doped and pure silica core optical fibers // *Nucl. Instr. Met. Phys. Res.* — 2004. — Vol. B215. — P. 187–195.
62. Pruett B. L., Peterson R. T., Smith D. E. et al. Gammaray to Cerenkov-light conversion efficiency for pure-silica-core optical fibers // *SPIE Proceedings.* — 1984. — Vol. 506. — P. 10–16.
63. Brun Ren, Bruyant F., Carminati Federico et al. — GEANT Detector Description and Simulation Tool, 1994.
64. GEANT4 Low Energy Electromagnetic Models for Electrons and Photons :



- techreport / CERN ; Executor: John Apostolakis, Simone Giani, M Maire et al. : 1999. — 11.
65. Geant4 (официальный сайт). — 2019. — URL: <http://geant4.cern.ch/>.
  66. Apostolakis J., Asai M., Bogdanov A.G. et al. Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications // Radiation Physics and Chemistry. — 2009. — Vol. 78, no. 10. — P. 859 – 873. — Workshop on Use of Monte Carlo Techniques for Design and Analysis of Radiation Detectors. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X09001650>.
  67. Girard S., Marcandella C. Transient and Steady State Radiation Responses of Solarization-Resistant Optical Fibers // IEEE T. Nucl. Sci. — 2010. — Vol. 57, no. 4. — P. 2049 – 2055.
  68. Goettmann W., Koerfer M., Wulf F. Beam profile measurement with optical fiber sensors at FLASH // Proceedings of 8th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator. — 2007. — P. 123–125.
  69. Gusarov A., Brichard B., Nikogosyan D.N. Gamma-radiation effects on Bragg gratings written by femtosecond UV laser in Ge-doped fibers // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2010. — Vol. 57, no. 4. — P. 2024 – 2028.
  70. H. Ross. Liquid Scintillation Counting and Organic Scintillators. — Taylor & Francis, 1991. — ISBN: 9780873712460. — URL: <https://books.google.ru/books?id=pzS0tG1-vrsC>.
  71. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. Drawing condition dependence of radiation-induced loss in optical fibres // Electron. Lett. — 1986. — Vol. 22, no. 2. — P. 106–108.
  72. Henschel H., Koehn O., Schmidt H.U. Optical fibres as radiation dosimeters // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 1992. — Vol. B69. — P. 307–314.
  73. Atkinson M.N., Crennell D.J., Fisher C.M. et al. A high resolution scintillating fiber (SCIFI) tracking device with CCD readout // Nucl. Instr. Met.

- Phys. Res. — 1988. — Vol. A263. — P. 333–342.
74. Angelini C., Beusch W., Bloodworth I.J. et al. High-resolution tracking with scintillating fibers // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. — 1989. — Vol. A277. — P. 132–137.
75. Gusarov A. I., Berghmans F., Deparis O., Fernandez Fernandez A. High total dose radiation effects on temperature sensing fiber bragg gratings // IEEE Photon. Tech. — 1999. — Vol. 11, no. 9. — P. 1159–1161.
76. Pat. WO/1999/050624 , Nuclear level sensing gauge using scintillating fiber bundle : / Houillion Paul L., Carmichael Kevin L. ; publ. October.1999.
77. Hubbell J. H., Gimm H. A., O/verbo/ I. Pair, Triplet, and Total Atomic Cross Sections (and Mass Attenuation Coefficients) for 1 MeV 100 GeV Photons in Elements Z=1 to 100 // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1980. — Vol. 9, no. 4. — P. 1023–1148. — <https://doi.org/10.1063/1.555629>.
78. Hubbell J. H., O/verbo/ I. Relativistic atomic form factors and photon coherent scattering cross sections // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1979. — Vol. 8, no. 1. — P. 69–106. — <https://doi.org/10.1063/1.555593>.
79. Ikhlef A., Skowronek M. Radiation position sensitive detector based on plastic scintillating fibers // Review of Scientific Instruments. — 1993. — Vol. 64, no. 9. — P. 2566–2569. — <https://doi.org/10.1063/1.1143868>.
80. Apostolakis J, Giani S, Urban L et al. An implementation of ionisation energy loss in very thin absorbers for the GEANT4 simulation package // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2000. — Vol. 453, no. 3. — P. 597 – 605. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900200004575>.
81. Tremblay N.M., Hubert-Tremblay V., Rachel Bujold Rachel et al. Improvement in the accuracy of polymer gel dosimeters using scintillating fibers //

- J. Phys. Conf. Ser. — 2010. — Vol. 250. — P. 1–4.
82. Deparis O., Griscom D.L., Megret P. et al. Influence of the cladding thickness on the evolution of the NBOHC band in optical fibers exposed to gamma radiations // J. Non-Cryst. Solids. — 1997. — Vol. 216. — P. 124–128.
83. Intermite A., Putignano M., Welsch C. P. Feasibility study of an optical fiber sensor for beam loss detection based on a SPAD array // Proceedings of 9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. — 2009. — P. 228–230.
84. Berghmans F., Brichard B., Fernandez Fernandez A. et al. An Introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors // Optical waveguide sensing and imaging. — Springer Series B: Physics and Biophysics, 2008. — P. 127–166.
85. Primak W., Edwards E., Keiffer D., Szymansk H. Ionization expansion of compacted silica and the theory of radiation-induced dilatations in vitreous silica // Phys. Rev. — 1964. — Vol. 133, no. 2A. — P. A531–A535.
86. Pat. 5793046 , Active cladding scintillating-fiber radiation detector : / Jeffers Larry, Reed Stuart ; publ. August.1998.
87. Jones A.K., Hintenlang D. Potential clinical utility of a fiber optic-coupled dosimeter for dose measurements in diagnostic radiology // Radiat. Prot. Dosim. — 2008. — Vol. 132, no. 1. — P. 80–87.
88. Pat. 20030098418 , Scintillation optical fibre device for collecting ionizing radiation : / Joubert Henri ; publ. May.2003.
89. Pat. 6703622 , Scintillation optical fibre device for collecting ionizing radiation : / Joubert Henri ; publ. March.2004.
90. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. — John Wiley & Sons, 2010. — P. 860. — ISBN: 9780470131480.
91. Koch H. W., Motz J. W. Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data // Rev. Mod. Phys. — 1959. — Vol. 31. — P. 920–955.

92. Krebber K., Henschel H., Weinand U. Fibre Bragg gratings as high dose radiation sensors // Meas. Sci. Technol. — 2006. — Vol. 17. — P. 1095–1102.
93. Kuhnenn J. Radiation tolerant fibres for LHC controls and communications // 5th LHC Radiation Workshop, CERN. — 2005.
94. Pat. WO/2013/003621 , Optical fiber having scintillation quencher, a radiation sensor and a radiation detection apparatus including the optical fiber and a method of making and using the same : / kUSNER Michael R. ; publ. January.2013.
95. Kuyt G., Regnier E., Gilberti R. Optical fiber behavior in radioactive environments // IEEE ICC meeting, St-Peterburg. — 2006.
96. L. Chichester D., M. Watson S., T. Johnson J. Comparison of BCF-10, BCF-12, and BCF-20 Scintillating Fibers for Use in a 1-Dimensional Linear Sensor // IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE. — 2013. — T. 60, № 5. — C. 4015–4021.
97. Pat. 7791046 , High efficiency fiber-optic scintillator radiation detector : / Laine Juha-pekka J., Miraglia Peter, Tapalian Jr. Charles H. ; publ. September.2010.
98. Pat. 5030834 , Fiber optic dosimeter system using electron trapping materials : / Lindmayer Joseph, Wrigley Charles Y. ; publ. July.1991.
99. GEANT4 simulation of Radiation Exposure Device scenario at bus stop : Rep. / Defence R&D Canada ; Executor: Chuanlei Liu, David Waller : 2012.
100. Lockwood F.C., Shah N.G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Symposium (International) on Combustion. — 1981. — Vol. 18, no. 1. — P. 1405 – 1414. — Eighteenth Symposium (International) on Combustion. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078481801440>.
101. Lopez-Higuera J. M. Optical Sensors. — Universidad de Cantabria, 1998.

102. Regnier E., Flammer I., Girard S. et al. Low-dose radiation-induced attenuation at Infrared wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres // IEEE T. Nucl. Sci. — 2007. — Vol. 54, no. 4. — P. 1115–1119.
103. Girard S., Vincent B., Ouerdane Y. et al. Luminescence spectroscopy of point defects in silica-based optical fibers // J. Non-Cryst. Solids. — 2005. — Vol. 351. — P. 1830–1834.
104. Mady F. and Benabdesselam M., Mebrouk Y., Dussardier B. Radiation effects in ytterbium-doped silica optical fibers: traps and color centers related to the radiation-induced optical losses // RADECS 2010 Proceedings. — 2010.
105. Magne S., De Carlan L.-L., Sorel S. et al. MAESTRO Project: development of a multi-Channel OSL dosimetric system for clinical use // Workshop on dosimetric issues in the medical use of ionizing radiation EURADOS AM 2008. — 2008.
106. Jang K.W., Cho D.H., Yoo W.J. et al. Measurement of Cerenkov light in a fiber-optic radiation sensor by using high-energy photon and electron beams // J. Korean Phys. Soc. — 2010. — Vol. 56, no. 3. — P. 765–769.
107. Lee Bongsoo, Jang Kyoung Won, Cho Kyoung Won, Yoo Wook Jae. Measurements and elimination of Cherenkov light in fiber-optic scintillating detector for electron beam therapy dosimetry // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. — 2007. — Vol. A579. — P. 344–348.
108. Jang K.W., Yoo W.J., Seo J.K. et al. Measurements and Removal of Cerenkov light generated in scintillating fiber-optic sensor induced by high-energy electron beams using a spectrometer // Opt. Rev. — 2011. — Vol. 18, no. 1. — P. 176–179.
109. Pat. 20110309257 , Radiation detection system including a scintillating material and an optical fiber and method of using the same : / Menge Peter R. ; publ. December.2011.
110. Merlo J.P, Cankocak K. Radiation-hardness studies of high OH—content quartz fibers irradiated with 24 GeV protons // CMS Conference Report. —

- 2006.
111. Messel H, Crawford D.F. ELECTRON-PHOTON SHOWER DISTRIBUTION FUNCTION. TABLES FOR LEAD, COPPER, AND AIR ABSORBERS. — 1970. — 01.
  112. Radiation hardened silica-based optical fibers : Rep. / Rome Air Development Center, Air Force Systems Command, GTE Laboratories ; Executor: W.J. Miniscalco, T. Wei, P.K. Onorato : RADC-TR-88-279 - Final Technical Report December 1986.
  113. Tregubov A. V., Prikhod'ko V. V., Alekseev A. S. et al. A Model of a Distributed Calorimetric Fiber Dosimeter Based on Stimulated Brillouin Scattering // Instrum Exp Tech. — 2020. — no. 63. — P. 538–542.
  114. Moloney W.E. A fiber-optic coupled point dosimetry system for the characterization of multi-detector computer tomography : Ph.D. thesis / W.E. Moloney ; University of Florida. — 2008.
  115. Mommaert C. Optoelectronic readout for scintillating fiber trackers // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 1992. — Vol. A323. — P. 477–484.
  116. Fernandez Fernandez A., Berghman F., Brichard B., Decreton M. Multiplexed fiber Bragg grating sensors for in-core thermometry in nuclear reactors // Fiber Optic Sensor Technology II, Proc. SPIE. — 2001. — Vol. 4204. — P. 40–49.
  117. Imai Shunichi, Soramoto Seiki, Mochiki Koichi et al. New radiation detector of plastic scintillation fiber // Review of Scientific Instruments. — 1991. — Vol. 62, no. 4. — P. 1093–1097. — <https://doi.org/10.1063/1.1142012>.
  118. Nishiura R., Izumi N. Radiation sensing system using an optical fiber // Mitsubishi Electric ADVANCE. — 2001. — P. 25–28.
  119. Pat. 5675151 , Distribution type detector using scintillation fibers : / Oka Toru, Ikegami Kazunori ; publ. October.1997.
  120. Nohtomi A., Sugiura N., Itoh T., Torii T. On-line evaluation of spatial dose-distribution by using a 15m-long plastic scintillation-fiber detector //

- 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. — 2008. — Oct. — P. 965–968.
121. Toh K., Shikama T., Nagata S. et al. Optical characteristics of aluminum coated fused silica core fibers under 14 MeV fusion neutron irradiation // J. Nucl. Mater. — 2004. — Vol. 329–333. — P. 1495–1498.
  122. Plazas M. C., Justus B. L., Falkenstein P. et al. Optical fiber detectors as in-vivo dosimetry method of quality assurance in radiation therapy // Revista Colombiana de Fisica. — 2005. — Vol. 37, no. 1. — P. 307–313.
  123. Benoit D., Vaille J-R., Ravotti F. et al. Optically Stimulated Luminescence Dosimetry // 1st Workshop on Instrumentation for Charged Particle Therapy. — London, 2007. — May.
  124. Origlio G. Properties and radiation response of optical fibers: role of dopants : Ph.D. thesis / G. Origlio ; Universita di Palermo. — 2009.
  125. Tables and graphs of electron-interaction cross sections from 10 eV to 100 GeV derived from the LLNL Evaluated Electron Data Library (EEDL),  $Z = 1$  to 100 : Rep. / Lawrence Livermore National Lab., CA (United States). ; chief S. T. Perkins, D. E. Cullen, S. M. Seltzer ; Executor: S. T. Perkins, D. E. Cullen, S. M. Seltzer : 1991. — 11.
  126. Naka R., Watanabe K., Kawarabayashi J. et al. Radiation distribution sensing with normal optical fiber // IEEE T. Nucl. Sci. — 2001. — Vol. 48, no. 6. — P. 2348–2351.
  127. Brichard B., Borgermans P., Fernandez Fernandez A. et al. Radiation effect in silica optical fiber exposed to intense mixed neutron–gamma radiation field // IEEE T. Nucl. Sci. — 2001. — Vol. 48, no. 6. — P. 2069–2073.
  128. Girard S., Ouerdane Y., Origlio G. et al. Radiation effects on silica-based preforms and optical fibers—I: experimental study with canonical samples // IEEE T. Nucl. Sci. — 2008. — Vol. 55, no. 6. — P. 3473–3482.
  129. Radiation effects, The 10 th Europhysical Conference on Defects in Insulation Materials // Phys. Status Solidi. — 2007. — Vol. 4, no. 3. —

- P. 1060–1175.
130. Brichard B., Fernandez Fernandez A., Ooms H. et al. Radiation-hardening techniques of dedicated optical fibres used in plasma diagnostic systems in ITER // *J. Nucl. Mater.* — 2004. — Vol. 329–333. — P. 1456–1460.
  131. Girard S., Marcandella C., Origlio G. et al. Radiation-induced defects in fluorine-doped silica-based optical fibers: Influence of a pre-loading with H<sub>2</sub> // *J. Non-Cryst. Solids.* — 2009. — Vol. 355. — P. 1089–1091.
  132. Forkel-Wirth Doris, Perrin Daniel, Scibile Luigi et al. Radiation monitoring system for the environment and safety project // 5th ST Workshop Echen-evex. Materials of the conference. — 2002. — 01.
  133. Paul M.C., Bohra D., Dhar A. et al. Radiation response behavior of high phosphorous doped step-index multimode optical fibers under low dose gamma irradiation // *J. Non-Cryst. Solids.* — 2009. — Vol. 355. — P. 1496–1507.
  134. Arvidsson B., Dunn K., Issever C. et al. The radiation tolerance of specific optical fibres exposed to 650 kGy(Si) of ionizing radiation // *JINST.* — 2009. — Vol. 4. — P. P07010.
  135. Wijnands T., De Jonge L.K., Kuhnenn J. et al. Radiation tolerant optical fibres for LHC beam instrumentation // 6th LHC Radiation Workshop, CERN. — 2007.
  136. Bartesaghi G., Conti V., Prest M. et al. A real time scintillating fiber dosimeter for gamma and neutron monitoring on radiotherapy accelerators // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2007. — Vol. 572, no. 1. — P. 228 – 230. — Frontier Detectors for Frontier Physics. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900206020699>.
  137. Bartesaghi G., Conti V., Prest M. et al. A real time scintillating fiber dosimeter for gamma and neutron monitoring on radiotherapy accelerators // *Nucl. Instr. Methods Phys. Res.* — 2007. — Vol. A572. — P. 228–230.



138. Pat. US5313065A , Fiber optic radiation monitor : / Reed Stuart E. ; publ. 1994.
139. Jones S.C., Sweet J.A., Braunlich P. et al. A remote fibre optic laser TLD system // Radiat. Prot. Dosim. — 1993. — Vol. 47. — P. 525–528.
140. O’Keeffe S., Fitzpatrick C., Lewis E., Al-Shamma’a A.I. A review of optical fibre radiation dosimeters // Sensor Rev. — 2008. — Vol. 28, no. 2. — P. 136–142.
141. O’Keeffe S., McCarthy D., Woulfe P. et al. A review of recent advances in optical fibre sensors for in vivo dosimetry during radiotherapy. // The British journal of radiology. — June. — 2015. — Vol. 88. — P. 20140702.
142. Alekseyev A.S., Prikhodko V.V., Novikov S.G. et al. RFID-based information system for monitoring personal radiation doses // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. — 2018. — P. 652.
143. Nakajima D., Ozel-Tashenov B., Bianchin S. et al. Scintillating fiber detectors for the HypHI project at GSI // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. — 2009. — Vol. A608. — P. 287–290.
144. Pat. 8183534 , Scintillating fiber dosimeter array : / Lacroix Frederic, Beaulieu Luc, Beddar Sam et al. ; publ. May.2012.
145. Bartesaghi G., Conti V., Bolognini D. et al. A scintillating fiber dosimeter for radiotherapy // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. — 2007. — Vol. A581. — P. 80–83.
146. Connell J.J., Binns W.R., Dowkontt P.F., Epstein J.W. The scintillating isotope experiment: BEVALAC calibrations of the test models // Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. — 1990. — Vol. 294. — P. 335–350.
147. ISaint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. — Scintillating Optical Fibers «It’s what’s Inside that Counts», 2014.
148. Akchurin N., Atramentov O., Carrell K. et al. Separation ofscintillation and Cherenkov light in an optical calorimeter // Nucl. Instr. Met. Phys. Res. —

2005. — Vol. A550. — P. 185–200.
149. Novikov S.G., Berintsev A.V., Svetukhin V.V. et al. Simulating a scintillation fiber detector of the activities of ionizing radiation sources // Results in Physics. — 2016. — Vol. 6. — P. 16 – 17. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379715000789>.
150. Svetukhin Viacheslav, Prihodko Victor V., Novikov Sergey G. et al. Simulation and Experimental Study of a Scintillation Fiber Detector of the Activities of  $^{63}\text{Ni}$ -,  $^{89}\text{Sr}$ - and  $^{90}\text{Sr}$ -Based Radiation Sources // Advanced Engineering Technology II. — Vol. 835 of Applied Mechanics and Materials. — Trans Tech Publications, 2016. — 6. — P. 626–631.
151. Novikov S.G., Berintsev A.V., Svetukhin V.V. et al. Simulation and Experimental Study of a Scintillation Fiber Detector of the Activities of  $^{63}\text{Ni}$ -,  $^{89}\text{Sr}$ - and  $^{90}\text{Sr}$ -Based Radiation Sources // The 2015 2nd International Conference on Advanced Engineering Technology. — Songdo Convensia, Incheon, 2015. — P. 59.
152. Skuja L., Tanimura K, Itoh N. Correlation between the radiation-induced intrinsic 4.8 eV optical absorption and 1.9 eV photoluminescence bands in glassy  $\text{SiO}_2$  // Appl. Phys. — 1996. — Vol. 80, no. 6. — P. 3518 – 3525.
153. Solovev A. Компьютерное моделирование взаимодействия ионизирующего излучения и вещества // ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. — 2013. — 03. — № 19.
154. Sporea D., Agnello S., Gelardi F.M. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. — Intech, 2010. — P. 49–66.
155. Gusarov A., Vasiliev S., Medvedkov O. and McKenzie I., Berghmans F. Stabilization of fiber Bragg gratings against gamma radiation // IEEE T. Nucl. Sci. — 2008. — Vol. 55, no. 4. — P. 2205 – 2212.
156. Toh K., Shikama T., Kakuta T. et al. Studies of radioluminescence in fused silica core optical fibers // Proc. SPIE. — 2002. — Vol. 4786.

157. Prikhodko V.V., Alexeyev A.S., Guskov P.A. et al. Technical Note: ID-card-size dosimeter based on radiochromic films for continuous personnel monitoring // *Med Phys.* — 2021.
158. Okamoto K., Toh K., Nagata S. et al. Temperature dependence of radiation induced optical transmission loss in fused silica core optical fiber // *J. Nucl. Mater.* — 2004. — Vol. 329–333. — P. 1503–1506.
159. Pat. 20030168602 , Scintillating fiber radiation detector for medical therapy : / Testardi Louis R. ; publ. September.2003.
160. Scibile Luigi, Perrin Daniel, Millan G et al. THE LHC RADIATION MONITORING SYSTEM FOR THE ENVIRONMENT AND SAFETY: FROM DESIGN TO OPERATION // *Proceedings of EPAC08.* — 2021. — 02.
161. Theriault S. Radiation effects on COTS laser-optimized multimode fibers exposed to an intense gamma radiation field // *Photonics North.* — 2006.
162. Hashim S., Ramli A.T., Bradley D.A., Wagiran H. The thermoluminescence response of Ge-doped optical fibers to X-ray photon irradiation // *J. Fiz. UTM.* — 2008. — Vol. 3. — P. 31–37.
163. Pat. 5640017 , Remote radiation detection device with inorganic scintillating detecting crystal and fiber optic : / Thevenin Jean-claude ; publ. June.1997.
164. Girard S., Ouerdane Y., Boukenter A., Meunier J.-P. Transient radiation responses of silica-based optical fibers: influence of modified chemical-vapor deposition process parameters // *J. Appl. Phys.* — 2006. — Vol. 99.
165. Treadaway M.J., Passenheim B.C., Kitterer B.D. Luminescence and absorption of electron-irradiated common optical glasses, sapphire, and quartz // *IEEE T. Nucl. Sci.* — 1975. — Vol. 22, no. 6. — P. 2253–2258.
166. Tsai Yung-Su. Pair Production and Bremsstrahlung of Charged Leptons // *Rev. Mod. Phys.* — 1974. — Vol. 46. — P. 815.— [Erratum: *Rev. Mod. Phys.*49,521(1977)].
167. Tsai Yung-Su. Erratum: Pair production and bremsstrahlung of charged leptons // *Rev. Mod. Phys.* — 1977. — Apr. — Vol. 49. — P. 421–423.—

- URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.49.421>.
168. Ulam S.M., J. von Neumann. On combination of stochastic and deterministic processes // Bull. Amer. Math. Soc. 53 1120. — 1947.
  169. Ulam S.M., Metropolis N. The Monte-Carlo method // J. Amer. Statist. Assoc, 44 Vol 247, 335-341. — 1949.
  170. Weeks R. A., Sonder E. The relation between the magnetic susceptibility, electron spin resonance, and the optical absorption of the E1 center in fused silica // Paramagnetic Resonance II. — Academic Press, 1963. — P. 869–879.
  171. Wootton Landon, Beddar Sam. Temperature dependence of BCF plastic scintillation detectors. // Physics in medicine and biology. — 2013. — May. — Vol. 58. — P. 2955–67.
  172. Wulf F., Koerfer M. Beam loss and beam monitoring with optical fibers // Proceedings of 9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. — 2009. — P. 411–417.
  173. Yoshida Y., Muto S., Tanabe T. Measurement of soft X-ray excited optical luminescence of a silica glass // CP882, X-ray Absorption Fine Structure / Ed. by B. Hedman, P. Pianetta. — American Institute of Physics, 2007.
  174. Pat. EP1004899 , Scintillating substance and scintillating wave-guide element : / Zagumenny A.I., Zavartsev J.D., Studenikin P.A. ; publ. October.2006.
  175. Zanio Kenneth. Cadmium Telluride // Cadmium Telluride / Ed. by Kenneth Zanio. — Elsevier, 1978. — Vol. 13 of Semiconductors and Semimetals. — P. iv. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0080878408600654>.
  176. Алексеев А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В. Волоконно-оптические сенсоры для дозиметрии // Фотон-Экспресс 6 (142) спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г.Пермь 3-6 октября 2017 года. — 2017. — Т. 6. — С. 215–216.
  177. Сенсорный элемент оптоволоконной дозиметрической системы :

- пат. 174124 RU. / Алексеев А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В. ; заявл. 2017 ; опубл. 2017.
178. Алексеев А.С., Приходько В.В., Трегубов А.В. Волоконные калориметрические сенсоры для дозиметрии // Фотон-Экспресс-Наука 2019. — 2019. — С. 344–345.
179. 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. — 2018. — С. 34–40.
180. Барсуков О.А. Основы физики атомного ядра. Ядерные технологии. — М.: Физматлит, 2011.
181. Блох А.Г., Журавлёв Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
182. Алексеев А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В. и др. Волоконно-оптический позиционно-чувствительный радиометр // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. — 2018. — С. 81–89.
183. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. Учебник для вузов. / Под ред. Е.Л. Столяровой. - 4-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
184. Далечина А.В. Разработка моделей и алгоритмов для расчетов потоков излучения медицинских электронных ускорителей : candthesis / А.В. Далечина ; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». — 2016.
185. Деев Ю.С. Применение сульфидно-кадмиевых фотоспротивлений в дозиметрии ионизирующих излучений // Атомная энергия. — 1959. — Т. 6, № 4. — С. 458–464.
186. Жуковский М.Е., Скачков М.В. О статистических методах моделирования переноса электронов в веществе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.

- Серия "Естественные науки". — 2009. — № 1.
187. Сцинтилляционное вещество (варианты) и сцинтилляционный волноводный элемент : пат. 2157552 Российская Федерация. / Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Студеникин П.А. ; заявитель и патентообладатель ТАСР ЛИМИТЕД. — № 98101544/06 ; заявл. 12.01.1998 ; опубл. 10.10.2000.
188. Иванов В.И. Курс дозиметрии: Учебник для вузов. - 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1978.
189. Трегубов А.В., Светухин В.В., Алексеев А.С., Новиков С.Г. 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. — 2018.
190. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. — М.:НИЯУ МИФИ, 2011.
191. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 2. Лучевая терапия пучками протонов, ионов, нейтронов и пучками с модулированной интенсивностью, стереотаксис, брахитерапия, радионуклидная терапия, оптимизация, гарантия качества. — М.:НИЯУ МИФИ, 2011.
192. Трегубов А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В. и др. Комплекс мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива // Автоматизация процессов управления. — 2017. — № 2(48). — С. 62–71.
193. Алексеев А.С., Беринцев А.В., Новиков С.Г., Приходько В.В. Компьютерное моделирование взаимодействия рентгеновского излучения с радиохромными пленками Gafchromic EBT3 // Медицинская физика. — 2017. — № 3(75). — С. 5–9.

194. Кучин Н.Л. Математическое моделирование радиационного воздействия атомных объектов морской техники на окружающую среду и человека : Дисс. . . кандидата наук / Н.Л. Кучин ; Санкт-Петербург. — 2002.
195. Левин В.Е., Хамьянов Л.П. Регистрация ионизирующих излучений. — М.: Атомиздат, 1973.
196. Литвинцев К.Ю. Совершенствование методов моделирования лучистого теплообмена и оптических свойств среды применительно к высокотемпературным технологическим процессам и пожарам : candthesis / К.Ю. Литвинцев ; ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». — 2012.
197. Алексеев А.В, Беляков И.М., Бочков А.И. и др. Методика САТУРН-2005. Математические модели, алгоритмы и программы решения многомерных задач переноса частиц и энергии // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. — 2013. — № 4. — С. 3–16.
198. Миронов Э.Г. Методы и средства измерений. — ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2009. — С. 446.
199. Многоканальная оптоволоконная дозиметрическая система : пат. 154082 RU. / Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В. и др. ; заявл. 2015 ; опубл. 2015.
200. Алексеев А.С., Беринцев А.В., Новиков С.Г. и др. Моделирование и исследование волоконного дозиметра для измерения мощности дозы гамма-излучения // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. — 2017. — С. 4–12.
201. Басс Л.П., Николаева О.В., Кузнецов В.С. и др. Моделирование распространения оптического излучения в фантоме биологической ткани на суперЭВМ МВС1000/М // Матем. моделирование. — 2006. — Т. 18, № 1. — С. 29–42.
202. Новиков С.Г., Беринцев А.В., Светухин В.В. и др. Моделирование сцинтилляционного оптического волокна BSF-60 для измерения активностей

- источников ионизирующего излучения // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. — 2015. — С. 192–200.
203. Трегубов А.В., Приходько В.В., Алексеев А.С. и др. Модель распределенного калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Приборы и техника эксперимента. — 2020. — № 4. — С. 109–114.
204. Мягков С.В., Шустов В.В., Левин Е.В. Системы безопасности, контроля и мониторинга // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. — 2011. — Т. 2.
205. Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В. Оптоволоконная дозиметрическая система на базе сцинтилляционного оптического волокна // Известия самарского научного центра российской академии наук. — 2013. — № 4. — С. 1017–1023.
206. Носимый радиационный монитор : пат. 123978 Российская Федерация. / Дерстуганов А., Шеин А.С., Крымов А.Л. и др. ; заявитель и патентообладатель Дерстуганов, А. and Шеин, А.С. and Крымов, А.Л. and Кунцевич, Г.А. and Викторов Л.В. — № 2012126452/28 ; заявл. 25.06.2012 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.
207. Оптоволоконная бета и гамма дозиметрическая система : пат. RU167517U1 Российская Федерация. / Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В. и др. ; заявл. 2016 ; опубл. 2016.
208. Оптоволоконная дозиметрическая система : пат. RU138047U1 Российская Федерация. / Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В., Коробко Д.А. ; заявл. 2013 ; опубл. 2013.
209. Панин М.П. Моделирование переноса излучения: Учебное пособие / Под ред. Т.В.Волвенкова. — М.: МИФИ, 2008.
210. Алексеев А.С., Беринцев А.В., Новиков С.Г. и др. Разработка и исследование волоконного дозиметра для детектирования рентгеновского и гамма-



- излучений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. — 2018. — Т. 4. — С. 18–24.
211. Новиков С.Г., Беринцев А.В., Светухин В.В. и др. Разработка и исследование сцинтилляционного волоконного радиометра для измерения активностей источников ионизирующего излучения на основе изотопа  $^{63}\text{Ni}$  // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — Т. 16, № 6. — С. 95–100.
212. Новиков С.Г., Беринцев А.В., Алексеев А.С. и др. Разработка персонального носимого дозиметра эффективной дозы с радиочастотным каналом передачи данных // Радиопромышленность. — 2018. — Т. 28, № 3. — С. 78–85.
213. Руколайне С.А. Линейное уравнение Больцмана: приближение, методы численного решения прямых задач и задач оптимизации, обобщение : кандthesis / С.А. Руколайне ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе». — 2018.
214. Сенсорный элемент оптоволоконной дозиметрической системы : пат. RU193439U1 Российская Федерация. / Новиков С.Г., Алексеев А.С., Беринцев А.В., Светухин В.В. ; заявл. 2017 ; опубл. 2019.
215. Приходько В.В., Новиков С.Г., Алексеев А.С. и др. Система мониторинга индивидуальных поглощенных доз ионизирующего излучения на основе радиохромной пленки Gafchromic EBТ3 // Автоматизация процессов управления. — 2018. — № 4(54). — С. 103–111.
216. Система мониторинга поглощенных доз ионизирующего излучения : пат. RU2677120С1 Российская Федерация. / Приходько В.В., Новиков С.Г., Беринцев А.В. и др. ; заявл. 2019 ; опубл. 2017.
217. Сушкевич Т.А. Математическое моделирование переноса излучения. — 2005.
218. Сцинтилляционный детектор электронного и бета-излучений : пат. 2441256

- Российская Федерация. / Черепанов А.Н., Чернухин Ю.И., Терехин В.А. и др. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина". — № 2010117133/28 ; заявл. 29.04.2010 ; опубл. 27.01.2012, Бюл. №3.
219. Франк М., Штольц В. Твердотельная дозиметрия ионизирующего излучения. Перев. с нем. Под ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. — М., Атомиздат, 1973.
220. Чирская Н.П. Математическое моделирование взаимодействия космических излучений с гетерогенными микроструктурами : candthesis / Н.П. Чирская ; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. — 2014.
221. Алексеев А.С., Беринцев А.В., Новиков С.Г., Приходько В.В. Численный расчет взаимодействия рентгеновского и гамма-излучений с радиохромными пленками Gafchromic EBТЗ // Международная научно-практическая конференция «Ядерная медицина и лучевая терапия: современное состояние и ближайшие перспективы». Сборник тезисов конференции. — 2017.
222. Шагалиев Р.М. Методы численного моделирования многомерных задач переноса излучения и частиц во ВНИИЭФ // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. — 2008. — № 12. — С. 26–37.
223. Штольц В., Бернхардт Р. Дозиметрия ионизирующего излучения. Пер. с нем. Я.А. Эйдуса. Под ред. К.К. Шверца. — Рига:Зинатне, 1982.
224. Алексеев А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В. и др. Экспериментальные исследования волоконного сенсорного элемента для дозиметрии радиационных гамма-источников // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. — 2018. — С. 144–145.
225. Юферев В.С., М.Г. Васильев, Прозект Л.Б. Новый метод решения задач переноса излучения в излучающих, поглощающих и рассеивающих средах // ЖТФ. — 1997. — Т. 67, № 9. — С. 1–7.

# Приложение А

## Акт внедрения результатов диссертационной работы



МИНОБРНАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ С.П.КАПИЦЫ**

432017, г. Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42  
тел.: (8422) 44-56-03  
факс: (8422) 41-20-88  
e-mail: contact@ulsu.ru  
www.ulsu.ru

18.08.2021 № 1  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### АКТ

Настоящий акт удостоверяет, что ряд результатов, полученных в диссертационной работе Алексеева А.С. были использованы в НИТИ им. С.П.Капицы УлГУ при разработке оптоволоконной системы мониторинга состояния сухого хранилища отработанного ядерного топлива при проведении исследований по тематическому плану 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, а именно:

1. были использованы конструкции, численные и математические модели первичных оптико-волоконных преобразователей для контроля различных параметров радиационных источников для применения в составе системы мониторинга состояния сухого хранилища отработанного ядерного топлива;
2. реализована концепция оптико-волоконной многоканальной системы радиационного контроля и управления с унифицированным оптическим интерфейсом для подключения оптико-волоконных преобразователей различных типов, позволяющая дистанционно проводить измерения в целях контроля радиационной обстановки на объектах атомной отрасли, в частности, в сухих хранилищах отработанного ядерного топлива.

Использование указанных результатов позволило улучшить эксплуатационные характеристики экспериментального образца системы мониторинга состояния сухого хранилища отработанного ядерного топлива.

«18» мая



Фомин А.Н., к.т.н., директор НИТИ им. С.П.Капицы

ФГБОУ ВО «УлГУ»