

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Физико-технический институт  
Направление - Физика  
Кафедра общей физики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время-цифрового преобразователя</b>

УДК 539.124.6:539.1.075

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ31	Быстров А.С.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Лаптев Р.С.	к. т. н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Е.В.	к. ф. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю.М.	д. т. н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой ОФ	Лидер А.М.	к. ф.-м. н.		

## Запланированные результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Способен самостоятельно приобретать новые знания, использовать современные образовательные и информационные технологии, совершенствовать и развивать свой профессиональный уровень, поддерживать здоровый образ жизни	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-7, ОК-8, ОК-11, ОК-19), Критерий 5 АИОР
P2	Способен к поиску, обработке и интерпретации с использованием современных информационных технологий данных, необходимых для формирования суждений по соответствующим социальным, научным и этическим проблемам как в коллективе, так и индивидуально (на родном и иностранном языке)	Требования ФГОС (ОК-3, ОК-4, ОК-8, ОК-14, ОК-15, ПК-10, ПК-12, ПК-13,), Критерий 5 АИОР
P3	Способен критически переосмысливать свой накопленный социальный и профессиональный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, следовать этическим и правовым нормам и нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-9, ОК-10, ПК-5, ПК-18), Критерий 5 АИОР
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P4	Способен к овладению и применению базовых знаний в области естественных наук и математики для решения профессиональных задач, к усвоению основных педагогических моделей, форм и приемов педагогического воздействия на личность; закономерностей педагогического	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-9, ОК-10, ОК-11, ПК-1, ПК-2, ПК-10), Критерий 5 АИОР
P5	Способен применить в проектах по тематике, заданной заинтересованными организациями, экспериментальные методы исследования конденсированного состояния вещества, методы анализа поверхности твердых тел и тонких пленок	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-14) , Критерий 5 АИОР
P6	Способен применить в проектах по тематике, заданной заинтересованными организациями, современную электронику в электрофизических и плазменных установках, а также учесть взаимодействие излучения и плазмы с веществом, современные достижения водородной энергетики и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОК-10, ОК-11, ПК-1, ПК-2), Критерий 5 АИОР
P7	Способен применить в проектах по тематике, заданной заинтересованными организациями, базовые естественнонаучные и математические знания при получении и исследовании наноматериалов	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-14), Критерий 5 АИОР
P8	Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, к применению на практике полученных знаний при обработке, анализе и синтезе полученных физических данных в соответствии с профилем профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-12, ОК-16, ОК-21, ПК-1, ПК-2, , ПК-5, ПК-6, ПК-7), Критерий 5 АИОР
P9	Способен понимать и использовать на практике теоретические основы планирования и организации физических исследований, представлять результаты и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-14), Критерий 5 АИОР
P10	Способен формировать суждения о значении и последствиях своей профессиональной деятельности с учетом социальных, правовых, этических и природоохранных аспектов, при необходимости применить ресурсо- и энергосберегающие технологии	Требования ФГОС (ОК-10, ОК-11, ПК-1, ПК-2, ПК-7, ПК-9)

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Физико-технический институт  
Направление - Физика  
Кафедра общей физики

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      \_\_\_\_\_ (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студент:

Группа	ФИО
ОБ31	Быстров Александр Сергеевич

Тема работы:

Спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время-цифрового преобразователя	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования является спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время-цифрового преобразователя.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обзор литературных источников по электрон-позитронной аннигиляции;</li> <li>– Изучение физических основ методов электрон-позитронной аннигиляции;</li> <li>– Набор экспериментальных спектров ВРАФ;</li> <li>– Обработка экспериментальных спектров;</li> <li>– Анализ полученных результатов;</li> <li>– Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>– Социальная ответственность.</li> <li>– Заключение</li> </ul>
--	---

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Меньшикова Е.В., доцент МЕН ИСГТ</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Федорчук Ю.М., профессор ЭБЖ ИНК</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Кабрышева О.П., старший преподаватель ИЯФТ ФТИ</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	<p>Глава 2. Экспериментальная установка для измерения времени жизни позитронов</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Лаптев Роман Сергеевич	К. Т. Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б31	Быстров Александр Сергеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студент:

Группа	ФИО
ОБЗ1	Быстров А.С.

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02. Физика

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Сумма затрат за электроэнергию – 1520 руб. Затраты на спец. оборудование – 34900 руб. Основная заработная плата – 202944 руб. Дополнительная заработная плата – 30442 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Амортизационные отчисления – 161 750 руб.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1 % Районный коэффициент – 30 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Потенциальные потребители результатов исследования Разработка анализа конкурентоспособности Построение диаграммы Исикава Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка финансовой эффективности – 0,52%

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Диаграмма Исикава
3. Матрица SWOT
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Е.В.	к. ф. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБЗ1	Быстров А.С.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студент:

Группа ОБ31	ФИО Быстров А.С.
----------------	---------------------

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02. Физика

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Целью данной работы является исследование спектрометра временного распределения аннигиляции позитронов на основе время - цифрового преобразователя.
2. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:
  - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля);
  - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы);
  - негативного воздействия на окружающую среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)
  - чрезвычайных ситуаций (техногенного и экологического характера).

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов производственной среды представлен в следующей последовательности:
  - приводятся данные по допустимым и оптимальным значениям звукового давления и микроклимата;
  - производится расчет освещенности на рабочем месте;
  - представлен анализ опасных факторов производственной среды.
2. Анализ выявленных опасных факторов производственной среды представлен в следующей последовательности:
  - представлена классификация помещений по электробезопасности;
  - приводится классификация пожароопасности помещений, а также класс пожароопасности;
  - представлен план эвакуации из лаборатории.
3. Охрана окружающей среды: организация безотходного производства
4. Защита в чрезвычайных ситуациях:
  - приводятся возможные ЧС (природная – сильные морозы, техногенная – диверсия);
  - разработка мер по предупреждению ЧС;
  - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:
  - специальные правовые нормы трудового законодательства (приведен перечень ГОСТов, СНиПов и др.)

### Перечень графического материала:

1. план размещения светильников в лаборатории
2. пути эвакуации из лаборатории

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю.М.	Д. Т. Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ31	Быстров А.С.		

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 103 страницы, 19 рисунков, 23 таблицы, 44 литературных источников, 1 приложение.

Ключевые слова: позитрон, электрон-позитронная аннигиляция, спектр, спектрометр, аппроксимация.

Объектом исследования является спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время - цифрового преобразователя.

Цель работы: обработка спектров временного распределения аннигиляционных фотонов.

В процессе исследования было набрано 3 серии спектров с применением различных источников позитронов.

В результате исследования были обработаны серии экспериментальных спектров, а также было определено экспериментальное время жизни позитронов в различных материалах с помощью программного обеспечения LT10.

## Оглавление

Введение.....	10
Глава 1. Методы электрон-позитронной аннигиляции (ЭПА) и физические основы методов ЭПА.....	12
1.1 Физические основы методов электрон-позитронной аннигиляции.....	12
1.1.1 Источники позитронов.....	13
1.1.2 Захват позитронов.....	16
1.1.3 Термализация позитронов.....	17
1.1.4 Диффузия.....	18
1.2 Анализ методов аннигиляции позитронов.....	19
1.2.1 Спектрометрия времени жизни позитронов (СВЖП).....	20
1.2.2 Спектрометрия доплеровского уширения аннигиляционной линии (СДУАЛ).....	23
1.2.3 Спектрометрия углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ).....	25
Глава 2. Экспериментальная установка для измерения времени жизни позитронов.....	28
2.1 Спектрометр времени жизни позитронов.....	28
2.2 Принцип работы спектрометра для измерения времени жизни позитронов.....	29
2.2.1 Описание конструкции спектрометра.....	32
2.2.1.1 Высоковольтный источник питания.....	33
2.2.1.2 Блок сцинтилляционных детекторов.....	34
2.2.1.3 Дифференциальный дискриминатор.....	37
2.2.1.4 Блок наносекундной задержки.....	39
2.2.1.5 Время – цифровой преобразователь.....	40
2.2.1.6 Многопараметровый (многоканальный) анализатор.....	40
Глава 3. Экспериментальные результаты.....	42
3.1 Обработка спектров ВРАП.....	42



3.2 Результаты обработки экспериментальных спектров.....	44
Глава 4. Финансовый менеджмент.....	49
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	49
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	49
4.3 Диаграмма Исикава.....	51
4.4 SWOT-анализ.....	52
4.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	56
4.6 Инициация проекта.....	57
4.7 План проекта.....	58
4.8 Бюджет научного исследования.....	60
4.9 Основная заработная плата.....	61
4.10 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	63
4.11 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	64
Глава 5. Социальная ответственность.....	67
5.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	67
5.1.1 Производственный шум.....	67
5.1.2 Некомфортные метеоусловия.....	69
5.1.3 Электромагнитное излучение.....	70
5.1.4 Освещенность.....	72
5.1.5 Электробезопасность.....	75
5.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	76
5.2.1 Факторы пожарной и взрывной природы.....	76
5.2.1.1 Промышленная санитария.....	79
5.2.2 Факторы электрической природы.....	80
5.3 Охрана окружающей среды.....	81
5.4 Защита в чрезвычайных ситуациях.....	81
5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	82
Заключение.....	84
Список использованных источников.....	85
Приложение А.....	90

## **Введение**

В настоящее время позитроны широко применяются для изучения разнообразных структурных и электронных свойств вещества и различных процессов, протекающих в них [1]. Исследования механизмов возникновения, превращения и исчезновения дефектов являются важными вопросами в физике твердого тела и физике материалов.

Для исследования электронной структуры и дефектов применимы методы аннигиляции позитронов, обладающие высокой чувствительностью к изменениям электронной структуры и дефектам вакансионного типа. Электронная структура в бездефектной области отличается от электронной структуры в дефекте, вследствие этого изменяются характеристики электрон-позитронной аннигиляции, то есть меняются характеристики импульсного и временного распределения аннигиляционных фотонов. По отличию данных характеристик можно делать выводы о дефектах структуры исследуемого вещества и об изменениях электронной структуры. Необходимым условием подхода к управлению структурно-чувствительными свойствами и процессами в твердых телах является создание достаточно полного представления о поведении различных дефектов [2].

Огромное влияние на свойства кристаллов оказывают дефекты. Свойства кристаллов, сильно зависящие от наличия дефектов, называются структурно-чувствительными. В них включаются диффузионные, магнитные, оптические, электрические, фотоэлектрические и другие. Также нужно отметить, что большинство структурно-чувствительных свойств оказываются нетривиальными, исключительными, так как происходят из-за образования дефектов в кристалле [1,3]. В кристалле со структурными дефектами позитрон будет притягиваться к локальным атомным образованиям, характеризующимся либо избыточным отрицательным зарядом, либо повышенным сродством к позитрону. Такие дефекты называются позитронно-чувствительными. Дефектами первого типа являются вакансии, вакансионные кластеры, а также

другие локальные свободные объемы. Когда происходит, связанное состояние вследствие этого может, появляться атом позитрония (Ps) [4]. Позитроний – это водородоподобный атом позитрон-электрон, который образует позитрон с электронами окружения при попадании в исследуемый материал.

Позитрон представляет собой античастицу электрона, которая обладает массой ( $0,511 \text{ МэВ}/c^2$ ), имеющая положительный заряд. После имплантации позитрона в твердое тело происходит термализация (в течение  $\sim 3 \text{ пс}$ ), т.е. быстро теряет исходную кинетическую энергию. Потом он случайно движется в кристаллической решетке и локализуется в межузельном пространстве из-за отталкивания со стороны положительно заряженных ионных остовов, а притяжения к электронам проводимости локализуется преимущественно в межузельном пространстве. Как следствие, в совершенном кристалле позитрон будет находиться в делокализованном состоянии блоховского типа.

Когда позитрон и электрон сталкиваются друг с другом, они должны аннигилировать с освобождением энергии, которая равна полной энергии данных частиц. Таким образом, данный процесс наступает, когда позитрон тормозит в веществе, т.е. когда энергия двух частиц равна их энергии покоя  $1,022 \text{ МэВ}$  [2,4]. Аннигиляция позитрона и электрона происходит вследствие электромагнитного взаимодействия. В том случае, когда позитрон и электрон аннигилируют, рождается виртуальный фотон. Появившиеся виртуальный фотон может образовать различные частицы, которые могут появляться с энергией, которая меньше или равна сумме энергий позитрона и электрона [5]. Вследствие этого аннигилирующие электрон-позитронные пары должны излучать пары фотонов, у которых общая энергия равна  $2m_0c^2$ , где  $m_0c^2 = 0,511 \text{ МэВ}$ . Эта энергия равна энергии массы покоя электрона. Без третьего фотона, который взаимодействует с аннигилирующей парой, закон сохранения энергии и закон сохранения импульса призывают испускания двух или более фотонов. Данные аннигилирующие фотоны находят себе применение в позитронной пучковой аннигиляционной спектроскопии для нахождения свойств электрона, участвующие в аннигиляционном процессе [6].

# Глава 1. Методы электрон-позитронной аннигиляции (ЭПА) и физические основы методов ЭПА

## 1.1 Физические основы методов электрон-позитронной аннигиляции

Контроль и исследование систем металл-водород имеет множество особенностей, которые связаны с большой реакционной способностью, т.е. возможность образования различных видов дефектов, таких как примесные атомы, границы зерен, дефекты вакансионного типа, а также дислокации. Нужно отметить, что высокая диффузионная подвижность водорода в материалах является важной особенностью. Более того, водород вызывает образование огромного количества новых дефектов, а также способствует взаимодействию со структурными дефектами в материале [7].

В спектроскопии множество преимуществ имеет применение аннигиляции позитронов для исследования дефектной и электронной структуры материала. Методы электрон-позитронной аннигиляции представляют собой неразрушающие инструменты исследования нанообъектов (вакансионных кластеров, вакансий), полостей, свободных объемов пор, пустот, химического состава в месте аннигиляции позитронов, а также их концентраций. Высокая чувствительность к структурным дефектам в материале – это одна из важных характеристик методов ЭПА [8]. Методы электрон-позитронной аннигиляции широко используются для исследования радиационных дефектов в материалах атомной техники [9].

К примеру, можно привести сравнения с другими методами, которые успешно применяются для изучения дефектообразования в материалах – рассеяние нейтронов, атомно-силовая микроскопия, оптическая микроскопия, рентгеновская микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия. При использовании данных методов есть возможность фиксировать точные величины характеристик различных дефектов (концентрации, размер, и т.д.) на определенной глубине. В сравнении с данными методами видно, что метод ЭПА является более чувствительным методом для изучения

дефектообразования в различных материалах, так как дает возможность обследовать различные типы дефектов на значительной глубине.

### 1.1.1 Источники позитронов

Основные способы получения позитронов это радиоактивные источники позитронов, в которых протекают реакции  $\beta^-$  – распада, а также сгенерированные электронами или фотонами электромагнитные ливни.

Позитроны получают на конвертерах и имеют широкий энергетический спектр с большим угловым и пространственным разбросом. При генерации позитронов электронами выделяется очень много энергии в виде тепла и КПД перевода становится очень малым. Генерирующий электронный пучок должен иметь малые размеры и расходимость. Более перспективно генерировать позитроны с помощью фотонов, которые позволяют получать пучки позитронов с малым эмиттансом [10]. Эмиттанс – это численная характеристика ускоренного пучка заряженных частиц, которая равна объему фазового пространства, занимаемого этим пучком [11].

Недостаток позитронных изотопных препаратов представляет собой плохую механическую прочность, которая связана с необходимостью применения сверхтонкой фольги для их упаковки. Это приводит к их применению только в лабораторных условиях обученными специалистами

Основным каналом получения позитронов являются  $\beta^+$  радиоактивные изотопы ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  и др.) [8]. Реакция  $\beta^+$  – распада имеет следующий вид:



где  $A$  и  $Z$  – массовые и зарядовые числа,  $X$  – материнское ядро,  $Y$  – дочернее ядро,  $e^+$  – позитрон,  $\nu$  – нейтрино. Причем, в большинстве случаев образующееся дочернее ядро находится в возбужденном состоянии. Поэтому за очень короткое время (меньше, чем  $10^{-11}$  с) после образования позитронов происходит его переход в основное состояние, испуская так называемый

ядерный  $\gamma$ -квант. Таким образом, ядерный  $\gamma$ -квант служит сигналом рождения позитрона. Вторичными называются ядерные  $\gamma$ -кванты, которые применяются в технологиях спектроскопии времени жизни позитронов для регистрирования момента рождения позитрона [12]. Основные свойства изотопов, которые используются в экспериментах ЭПА, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные свойства изотопов используемых в методах электрон-позитронной аннигиляции [8]

Изотоп	Период полураспада	Выход позитронов	Макс. энергия позитронов, МэВ	Энергия вторичного $\gamma$ -кванта, МэВ
$^{13}\text{N}$	10 мин.	1	1,20	–
$^{15}\text{O}$	123 с.	1	1,74	–
$^{18}\text{F}$	110 мин.	0,97	0,63	–
$^{19}\text{Ne}$	17 с.	1	2,22	–
$^{22}\text{Na}$	2,6 лет	0,9	0,54	1,27
$^{26}\text{Al}$	$8 \cdot 10^5$ лет	0,85	1,17	1,81
$^{44}\text{Ti}$	47 лет	0,94	1,47	1,16
$^{58}\text{Co}$	71 день	0,15	0,47	0,81
$^{57}\text{Ni}$	36 часов	0,46	0,85	1,37
$^{68}\text{Ge}$	275 дней	0,88	1,90	1,08
$^{89}\text{Zr}$	79 часов	0,22	0,9	–

При измерении времени жизни позитрона в веществе, используется источник позитронов на основе позитронно-активных изотопных препаратов [13], с максимальной энергией 1,467 МэВ. Источник позитронов на основе изотопа  $^{44}\text{Ti}$  обладает преимуществом над источником  $^{22}\text{Na}$ :

- а) огромный выход позитронов (около 97%);
- б) высокая прочность источника, т.е. наличие защитной капсулы;

в) огромная энергия позитронов, которая дает возможность исследовать материал на больших глубинах;

г) большой период полураспада (47 лет), вследствие этого большой срок службы источника [8].

Характеристика  $\beta^+$  – распада заключается в непрерывном энергетическом спектре испускаемых позитронов благодаря тому, что энергия для осуществления распада теряет на энергию позитрона и энергию  $\gamma$ -квантов (с энергией 1,274 МэВ) [14].

В таблице 2 приведена средняя глубина проникновения позитрона в материал, от источника  $^{44}\text{Ti}$ .

Таблица 2 – Средняя глубина проникновения позитронов в материал [8]

Материал	Средняя глубина проникновения, мкм
Ti	236
Fe	136
Cu	120
Ni	120
Zr	164

Другой вид позитронных источников представляет собой ускорители, которые могут ускорять непосредственно позитроны, либо позитроны получаются в результате ядерных реакций ( $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$ ) ускоренных частиц на специальных мишенях или непосредственно на элементах исследуемого материала [15]. В линейных ускорителях можно получить позитроны любых энергий, но высокая стоимость таких ускорителей, приблизительно несколько миллионов долларов, а часто и десятков миллионов, приводит к тому, что их используют только элитарные лаборатории мира [16].

### 1.1.2 Захват позитронов

Позитроны, которые попадают в исследуемый материал из радиоактивных источников ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Co}$  и т.д.), далее начинают терять энергию, а также взаимодействовать с атомами кристалла [17].

В твердом теле позитрон может существовать в двух состояниях: делокализованном в кристаллической решетке и локализованном в окрестности дефектов кристаллического строения с различными аннигиляционными характеристиками в этих состояниях.

Делокализованное состояние позитрона – это состояние, при котором позитрон движется в бездефектной решетке и не захватывается дефектами, а состояние позитронов, которые захватываются дефектами, является локализованным состоянием. Локализованное состояние позитронов более стабильное, чем делокализованное состояние, так как имеет меньше собственную энергию. В локализованном состоянии по величине времени жизни позитрона можно делать выводы о размере дефекта и типе дефекта. Переход позитронов из делокализованного состояния в локализованное называют захватом позитронов, вследствие этого энергия позитрона представляет собой разность между этими состояниями [8,18,19].

Вакансионные кластеры и вакансии обладают меньшей электронной плотностью, чем средняя электронная плотность бездефектного материала, так как отсутствуют ионные остовы, это связано с образованием глубокой потенциальной ямы для позитронов в их окрестностях. В таком роде дефектов энергия связи позитрона равна до нескольких эВ [20]. В работе [21] продемонстрировано, что время жизни резко возрастает при увеличении числа вакансий, а также по величине времени жизни позитрона можно догадываться о размере кластера.

В процессе захвата позитронов дефектами, которые не имеют открытого объема, полагается, что при температурах выше комнатной, позитрон



вырывается из дислокации или захватывается другими дефектами, которые связаны с вакансиями.

Существует два случая при захвате позитронов дефектами:

1) Режим ограниченной диффузии, когда процесс захвата определяется транспортным фактором, т.е. движением позитронов в окрестности дефектов. Потенциальная яма неглубока и энергия захвата позитронов небольшая. Типичный пример, это захват позитронов на границах зерен.

2) Режим распространения. В этом случае, движение позитронов может быть описано распространением блоховской волны. Ярким примером такого перехода является захват позитронов вакансиями [8,21].

### 1.1.3 Термализация позитронов

Позитрон, движущийся с большой скоростью, попадает в какое-либо вещество, затем взаимодействует со встречными атомами. При этом имеют место те же процессы, что и при прохождении  $\beta^-$  – излучения через вещество: рассеяние, ионизация атомов и молекул, а также тормозное излучение. В результате этих процессов очень быстро (за время порядка  $10^{-12}$ ) энергия позитрона уменьшается до значения, соответствующего температуре окружающей среды ( $3/2$  кТ) [22].

В том случае, когда позитрон попадает в материал, затем происходит термализация за время 1-10 пс, а также будет захватываться дефектами до тех пор, пока не пройдет аннигиляция с электроном. Термализованный позитрон создает потенциал в веществе или материале, который создается электронами с большими значениями импульсов. Термализацией называется процесс, в котором позитрон в веществе теряет свою кинетическую энергию до теплового уровня. Время жизни позитрона в веществе намного меньше, чем время термализации. Вследствие этого маленький вклад от времени термализации вносится во время жизни позитрона [23]. Позитроны с низкими энергиями

способны аннигилировать с электронами с испусканием  $\gamma$ -квантов. Аннигиляцией называется процесс взаимодействия электрона и позитрона, в результате которого обе частицы исчезают. На самом деле они не исчезают, а превращаются в два или несколько фотонов. Позитрон, излученный из радиоактивного источника (эмиттера), после того когда попадает в твердое тело термализуется и тратит кинетическую энергию до значения, которое соответствует температуре кристалла [22,24].

Важную роль в полупроводниках имеющих сложный состав играет рассеяние на оптических фононах. На акустических фононах в ионных кристаллах происходит рассеяние позитронов, т.е. для позитронов с малыми энергиями возможна термализация [24]. В работе [25] рассматриваются замедления и взаимодействия позитронов вследствие взаимодействий с точечными дефектами, нейтральными или заряженными дефектами, а также дислокациями. На принципе расчетов сделали вывод что: эффективное время термализации при взаимодействии с оптическими и акустическими фононами показывает полную термализацию, приблизительно до температур 10 К, как для ионных кристаллов, так и для полупроводников. В областях температур, менее 10 К, главным механизмом термализации позитронов характеризуется их взаимодействие с дислокациями, нейтральными атомами и точечными дефектами. Отсюда следует, что позитроны термализуются в ионных кристаллах и полупроводниках при низких температурах.

#### 1.1.4 Диффузия

После попадания позитронов в образец, т.е. когда происходит замедление до тепловых энергий, дальше позитроны могут перемещаться по объему, до того как произойдет аннигиляция, это возможно при учете захвата позитронов различными дефектами. В основном это передвижение можно рассматривать как диффузию в среде, имеющую распределение центров захвата, с определенными граничными условиями, которые включают в себя

свободную поверхность, а также внутренние границы раздела. После термализации позитрона следует процесс диффузии позитрона, т.е. позитрон диффундирует в свободном или делокализованном состоянии по материалу и начинает аннигилировать из данного состояния за время около 100 пикосекунд. Каждый металл и их соединения имеют свое время жизни позитронов в делокализованном состоянии [8,22].

При захвате позитронов дефектами в веществе, спектр времени жизни позитронов имеет две компоненты, в том случае, когда длина диффузии позитрона равна расстоянию между дефектами, тогда некоторая часть позитронов аннигилирует из делокализованного состояния, а другие позитроны аннигилируют из локализованного состояния [24].

Когда позитрон приходит в состояние температурного равновесия с окружающей средой, далее он продолжает диффундировать, а также рассеиваться на фононах решетки. Данное рассеяние называется квазиупругим, и никак не оказывает влияние на средний импульс термализационного позитрона. Для металлов средняя длина диффузии лежит в области от 100 до 200 нм. Также среднюю длину диффузии позитрона можно определить средним расстоянием от точки аннигиляции и точки термализации позитрона, дающая информацию об области, исследуемую единичными позитронами [8,25,26].

## 1.2 Анализ методов аннигиляции позитронов

Методы электрон-позитронной аннигиляции (ЭПА) представляют собой эффективные лабораторные методики для исследования электронной и дефектной структуры материалов [17]. Данные методы основаны на том, что характеристики процесса аннигиляции позитронов, а именно временное и импульсное распределение аннигиляционных фотонов различаются при изменении электронной структуры материала, которое обусловлено наличием различных типов дефектов.

Существует три основных метода анализа позитронной спектроскопии:

1) Метод временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ). Позитроны вылетают из радионуклидного источника и направляются в материал, там происходит аннигиляция с электронами с некоторой вероятностью, которая зависит от свойств материала (рисунок 1). Основой метода является измерение скорости счета запаздывающих совпадений в промежуток времени между регистрации  $\gamma$  – кванта, имеющего энергию 1,157 МэВ, который испускается при распаде  $^{44}_{21}\text{Sc}$  в  $^{44}_{20}\text{Ca}$  (данное события является «стартом» начала отсчета времени) и регистрации фотона имеющего энергию 0,511 МэВ, который испускается вследствие аннигиляции позитронов (событие является сигналом «стоп»).

2) Метод доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ). Метод основывается на измерении распределения энергии аннигиляционных фотонов с помощью эффекта Доплера, с помощью которого регистрируется уширение  $\Delta E$ . По причине эффекта Доплера, когда увеличивается скорость аннигилирующей пары, то распределение энергий аннигиляционных фотонов становится больше.

3) Метод углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ). Суть метода заключается в получении информации об импульсном распределении  $e^-$ , так как УРАФ согласно законам сохранения импульса и энергии взаимосвязаны с импульсом аннигилирующей пары. Данный метод довольно часто применяется для изучения поверхности Ферми в дефектах, а также в бездефектных объемах.

Первый из этих методов дает сведения об электронной плотности в месте аннигиляции позитронов, а два других – информацию о распределении импульсов электронов и о химическом составе материала.

### 1.2.1 Спектрометрия времени жизни позитронов (СВЖП)

Одним из наиболее распространенных методов наблюдения позитрония в среде – ВРАФ является определение временных компонент аннигиляции

позитронов. При помощи метода ЭПА, измерение спектроскопии по времени жизни позитронов можно определить размер нанобъектов (вакансионных кластеров, вакансий), полостей, свободных объемов пор, их концентраций в большинстве дефектных полупроводниках и наноматериалах [22]. Основное преимущество метода ВРАФ заключается в высокой скорости набора экспериментальной информации. Для анализа дефектов в структуре материала в наши дни широко используется спектроскопия времени жизни позитронов (СВЖП).

После того как позитрон попал в материал, далее он теряет кинетическую энергию в процессах неупругого и упругого рассеяния и аннигилирует с электронами вещества с появлением двух аннигиляционных  $\gamma$ -квантов с энергией 0,511 МэВ [11,12].

Время жизни позитрона в веществе характеризуется функцией, которая зависит от электронной плотности исследуемого вещества. В бездефектных состояниях для различных металлов, среднее время жизни будет различным, так как электронная плотность бездефектного кристалла больше электронной плотности в структурных дефектах объемного типа. Следовательно, время жизни позитронов в дефектах, значительно больше времени жизни в бездефектном материале [22,23]. Суть заключается на измерении времени между событиями: рождением позитрона и его аннигиляцией с электроном. Чаще всего для измерения времени жизни позитрона используется источник, который излучает одновременно вторичный  $\gamma$ -квант и позитрон. Данный  $\gamma$ -квант указывает на появление позитрона и является сигналом «старт», а сигнал «стоп» представляет собой один из двух аннигиляционных  $\gamma$ -квантов имеющих энергию 0,511 МэВ. Относительно плохая способность источников позитронов дает возможность выделять импульсы «старт» и «стоп», которые соответствуют одному позитрону, потому что есть предположение, что не более одного позитрона может находиться в веществе в каждый момент времени. Для измерения маленьких промежутков времени есть необходимость в использовании быстрых детекторов или систем сбора данных с точными

временными характеристиками. Время жизни позитронов в различных материалах лежит в диапазоне от 0,1 до 1 нс. В наше время в технологии СВЖП для регистрации  $\gamma$ -квантов используются сцинтилляционные детекторы, так как обладают хорошими временными характеристиками. Основа метода продемонстрирована на рисунке 1.

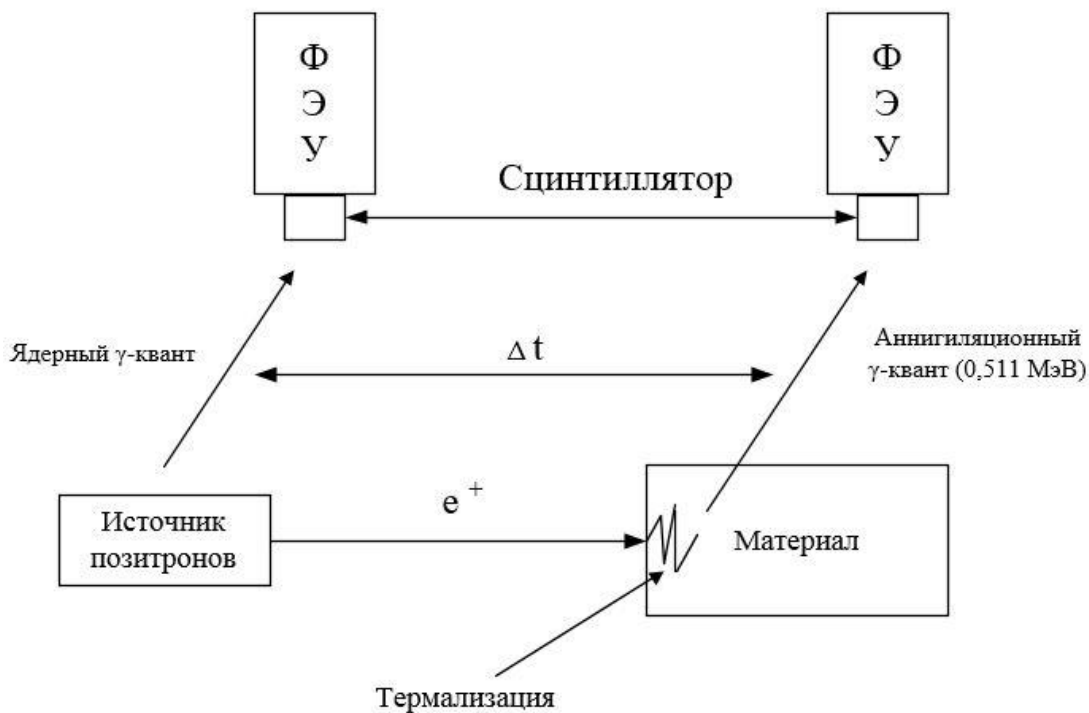


Рисунок 1 – Схема измерения времени жизни позитронов [22]

Обработка сигналов с детекторов осуществляется при помощи амплитудной селекции. Система должна быть настроена так, чтобы с первого детектора отбирались импульсы, которые соответствуют событиям «старт», а со второго детектора только события «стоп», соответственно. Затем данные импульсы отобранные детектором применяются в качестве точек начала и конца отсчета на временной зависимости. Далее в спектр времени жизни позитронов записываются полученные значения времени жизни, где по оси ординат – интенсивность ( $I$ ), а по оси абсцисс – время жизни ( $t$ ). С помощью выражения (2) можно описать экспериментальный спектр [27]:

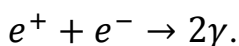
$$y(t)=N(t)*R(t)+B, \quad (2)$$

где  $y(t)$  – полученный спектр,  $R(t)$  – функция разрешения,  $N(t)$  – теоретический спектр,  $B$  – уровень фона.

В настоящий момент обрабатывать сигналы с детекторов можно при помощи цифровых либо аналоговых модулей. Аналоговые модули по многим параметрам уступают цифровым, данные модули используются во многих исследовательских центрах для изучения различных материалов методом СВЖП.

### 1.2.2 Спектрометрия доплеровского уширения аннигиляционной линии (СДУАЛ)

Метод спектрометрии доплеровского уширения аннигиляционной линии (СДУАЛ) основывается на получении информации о различных типах дефектов, а также в получении информации об импульсном распределении электронов в веществе. Основа метода ДУАЛ является измерением времени между ядерным  $\gamma$ -квантом с характерной энергией 1,274 МэВ, генерируемым практически одновременно с рождением позитрона в реакции распада  $^{44}\text{Ti}$  и одним из  $\gamma$ -квантов с энергией 0,511 МэВ, который испускается вследствие аннигиляции [8,28]. Изучение импульсного распределения с помощью метода ДУАЛ дает возможность получать информацию о фазовых переходах, а также химическом составе в месте аннигиляции позитронов. С помощью данного метода путем измерения энергетического сдвига относительно энергии 0,511 МэВ, можно судить об измерении энергетического распределения аннигиляционных фотонов. Этот сдвиг образуется вследствие ненулевого момента аннигилирующей электрон-позитронной пары и используется для исследования импульсного распределения электронов в исследуемом материале. Процесс аннигиляции позитрона и электрона с высокой долей вероятности сопровождается испусканием двух  $\gamma$ -квантов. Чаще всего наблюдается двухфотонная аннигиляция:



В системе центра масс аннигилирующей пары, суммарный импульс электрон-позитронной пары равен нулю. Таким образом, два аннигиляционных  $\gamma$ -кванта обладают энергией покоя электрона (0,511 МэВ) и испускаются в противоположных направлениях [22]. Для измерения энергетического спектра  $\gamma$ -квантов в основном используются полупроводниковые детекторы, сигналы с которых через зарядово-чувствительные предусилители регистрируются многоканальным анализатором. Амплитуда импульса, генерируемого услителем при регистрации  $\gamma$ -квантов в детекторе пропорциональна энергии зарегистрированного фотона.

В данном случае, к явлению ЭПА применим закон сохранения импульса, так как происходит переход импульса пары в импульс аннигиляционных фотонов, энергия которых равна 0,511 МэВ, которые разлетаются в противоположные стороны, соответственно. Вследствие термализации импульс аннигилирующего позитрона не велик, так как импульс электрона вносит основной вклад в импульс пары [22,28].

На рисунке 2 представлена аналоговая схема спектрометра ДУАЛ [8].

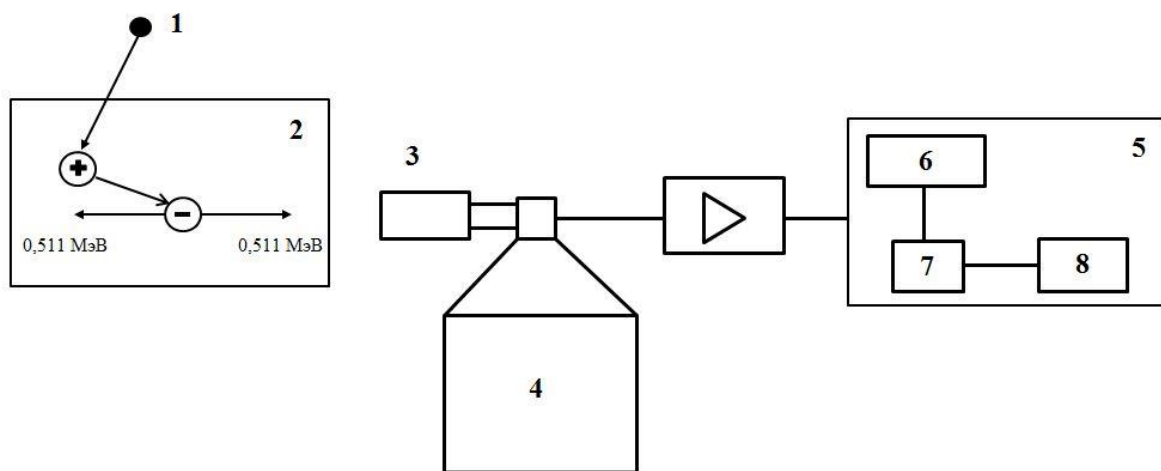


Рисунок 2 – Аналоговая схема спектрометра ДУАЛ: 1 – источник позитронов, 2 – образец, 3 – детектор, 4 – сосуд Дьюара с жидким азотом, 5 – многоканальный анализатор, 6 – стабилизатор, 7 – аналого-цифровой преобразователь, 8 – память.



### 1.2.3 Спектрометрия углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ)

Данный метод ЭПА базируется на нахождении углового распределения аннигиляционных фотонов. При  $2\gamma$  – аннигиляции покоящейся электрон – позитронной пары (скорость равна нулю), два  $\gamma$ -кванта разлетаются в противоположных направлениях с энергией 0,511 МэВ. В случае если скорость не равна нулю, то угол между двумя  $\gamma$ -квантами равен  $180^\circ \pm \theta$  (в лабораторной системе координат), а энергия  $\gamma$ -квантов равна  $0,511 \text{ МэВ} \pm \Delta E$  [29].

Сечение двухфотонной аннигиляции можно записать следующим образом:

$$\sigma_{2\gamma} = \frac{\pi c r_0^2}{v}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света,  $r_0$  – классический радиус электрона,  $v$  – скорость позитрона. Как видно из формулы 3, с уменьшением скорости позитронов сечение аннигиляции будет расти до бесконечности. Поэтому в подавляющем большинстве случаев аннигиляция происходит после того, как позитрон потерял всю свою энергию в результате столкновений с атомами вещества, то есть при  $v \approx 0$ .

Вероятность аннигиляции будет определяться электронной плотностью вещества  $n_e$ :

$$\lambda = \pi c r_0^2 \cdot n_e. \quad (4)$$

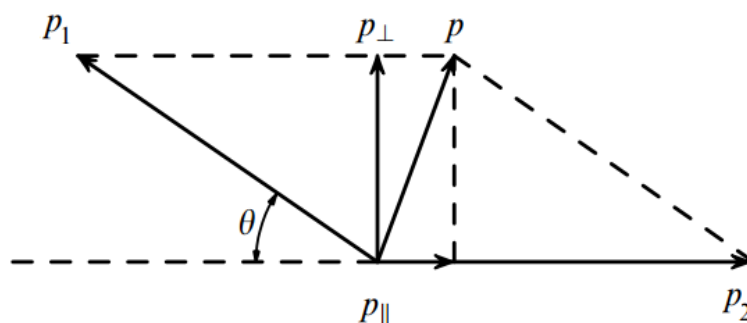


Рисунок 3 – Схема движения  $\gamma$  – квантов при двух–квантовой аннигиляции электрон-позитронной пары:  $p$  – импульс  $e^+ - e^-$ ,  $p_1$  и  $p_2$  – импульсы разлетающихся  $\gamma$ -квантов [22].

Пусть позитрон с импульсом  $\mathbf{p}$  и кинетической энергией  $T$  налетает на электрон с энергией  $m_e c^2$ . В результате аннигиляции образуются два фотона с энергиями  $E_1 = p_1 c$  и  $E_2 = p_2 c$ , где  $p_1$  и  $p_2$  – их импульсы, соответственно. Законы сохранения импульса и энергии в данном случае имеют вид:

$$T + 2m_e c^2 = p_1 c + p_2 c, \quad (5)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2, \quad (6)$$

Если скорость позитрона равна нулю, получаем систему уравнений:

$$2m_e c^2 = p_1 c + p_2 c, \quad (7)$$

$$0 = p_1 + p_2. \quad (8)$$

Из данного рассуждения следует, что при аннигиляции покоящейся электрон-позитронной пары  $\gamma$ -кванты распространяются в противоположных друг от друга направлениях (угол разлетающихся квантов равен  $180^\circ$ ) с одинаковой энергией  $m_0 c^2 = 0,511$  МэВ  $\gamma$ -квантов. Если импульс  $\gamma$ -квантов не равен нулю, то углы между направлениями движения  $\gamma$ -квантов будут отличны от  $180^\circ$  на величину  $\theta$ , вследствие этого энергия  $\gamma$ -квантов не будет равна 0,511 МэВ (рисунок 3). Угол  $\theta$  определяется выражением:

$$\theta \approx \sin \theta = \frac{p_\perp}{m_e c}, \quad (9)$$

а изменение энергии  $\gamma$ -кванта (доплеровский сдвиг) задается выражением:

$$\Delta E_\gamma \approx \frac{p_\parallel c}{2}, \quad (10)$$

где  $p_\parallel$  и  $p_\perp$  – продольная и поперечная составляющие импульса  $p$ .

Таким образом, измерение угла  $\theta$  или доплеровского сдвига энергии  $\Delta E_\gamma$  позволяет определить импульс аннигилирующей  $e^+ - e^-$  пары в лабораторной системе координат.

Схема спектрометра для измерения УРАФ представлена на рисунке 4.

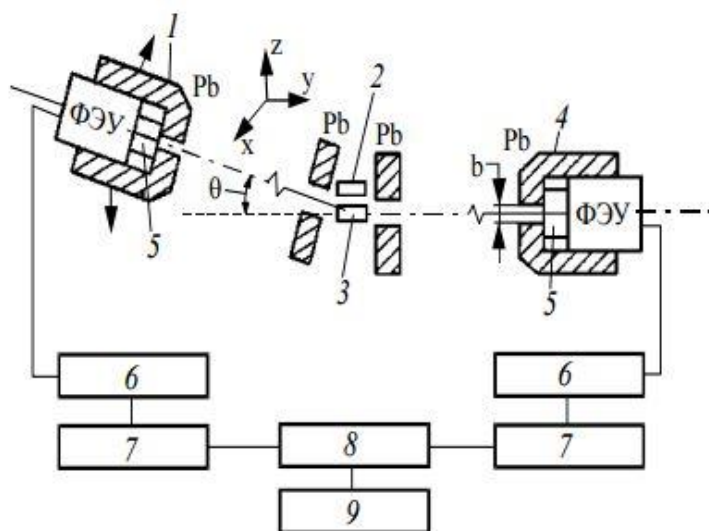


Рисунок 4 – Схема установки для исследования УРАФ: 1,4 – ФЭУ, 2 – источник позитронов, 3 – образец, 5 – сцинтиллятор, 6 – усилители, 7 – дискриминаторы, 8 – схема совпадений, 9 – персональный компьютер [29].

Позитрон, вылетая из источника (2), попадает в образец (3), где термализуется и аннигилирует с образованием двух  $\gamma$ -квантов, которые регистрируются сцинтилляционными детекторами (5) подвижного и неподвижного плеча. Разрешение установки определяется коллиматорами (1). Импульсы с ФЭУ через усилители (6) и дискриминаторы (7) попадают на схему совпадений (8) и подсчитываются компьютером (9). Источником позитронов служит изотоп  $\text{Cu}^{64}$ , нарабатываемый в реакторе с периодом полураспада 12,7 часов, то необходимо учитывать снижение активности источника в течение эксперимента. С этой целью также подсчитываются импульсы с каждого дискриминатора (7) отдельно. Позитрон, попадая в среду, быстро теряет свою энергию, за время много меньше характерного времени аннигиляции. Кроме того, сечение аннигиляции высокоэнергетичного позитрона мало. В связи с этим угловой спектр представляет собой спектр распределения импульсов электрона в проекции на выбранную ось [29,30].

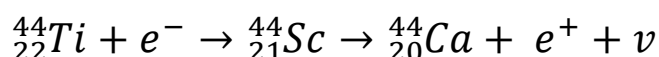
## Глава 2. Экспериментальная установка для измерения времени жизни позитронов

### 2.1 Спектрометр времени жизни позитронов

Для измерения времени жизни позитронов в материале применяется метод запаздывающих совпадений. Идея метода основывается на измерении скорости счета запаздывающих совпадений между аннигиляционным  $\gamma$ -квантом у которого энергия равна 0,511 МэВ, и ядерным  $\gamma$ -квантом практически одновременно испущенным с позитроном. Время жизни позитрона в материале зависит от плотности электронов преобладающие около позитрона [10].

В данном эксперименте применяется радиоактивный источник позитронов  $^{44}\text{Ti}$ , который может обладать различной активностью. Максимальная энергия позитронов в данном источнике 1,467 МэВ. В качестве защитной капсулы источника применяется титановая капсула. Основной недостаток наличия защитной капсулы заключается в том что, происходит очень большой вклад процессов аннигиляции в капсуле [13].

Реакцию распада  $^{44}\text{Ti}$  можно записать следующим образом:



На рисунке 5 приведен энергетический спектр распада  $^{44}\text{Ti}$ :

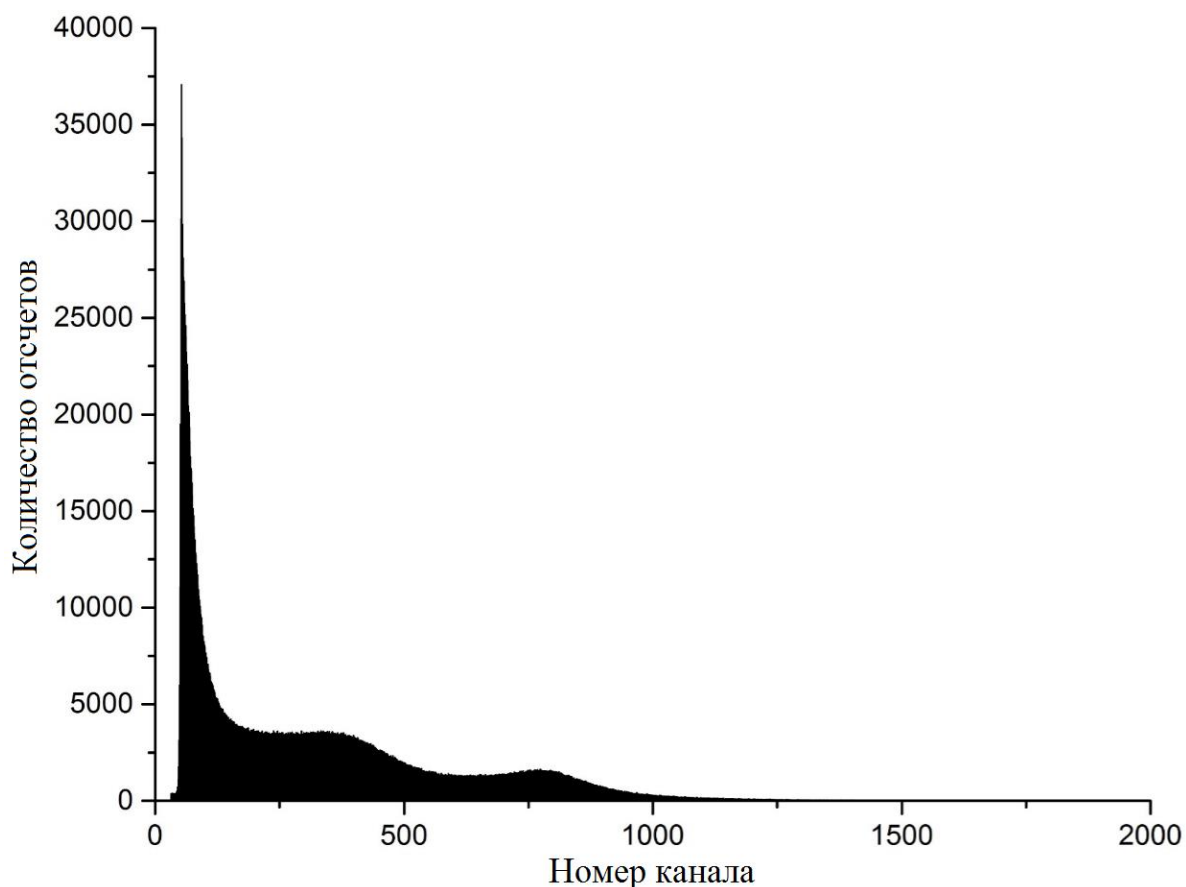


Рисунок 5 – Энергетический спектр распада  $^{44}\text{Ti}$

## 2.2 Принцип работы спектрометра для измерения времени жизни позитронов

Установка состоит из традиционной быстрой цепи, которая включает в себя высоковольтный источник питания (FAST ComTec NHQ 203M), два сцинтилляционных детектора (Hamamatsu H3378-50), два быстрых дифференциальных дискриминатора (FAST ComTec model 7029A), блок наносекундной задержки (Canberra model 2058), время-цифровой преобразователь (FAST ComTec dual TADC 7072T), многопараметровый многоканальный анализатор (FAST ComTec MPA4) и персональный компьютер. Спектрометр времени жизни позитронов представлен на рисунке 6.

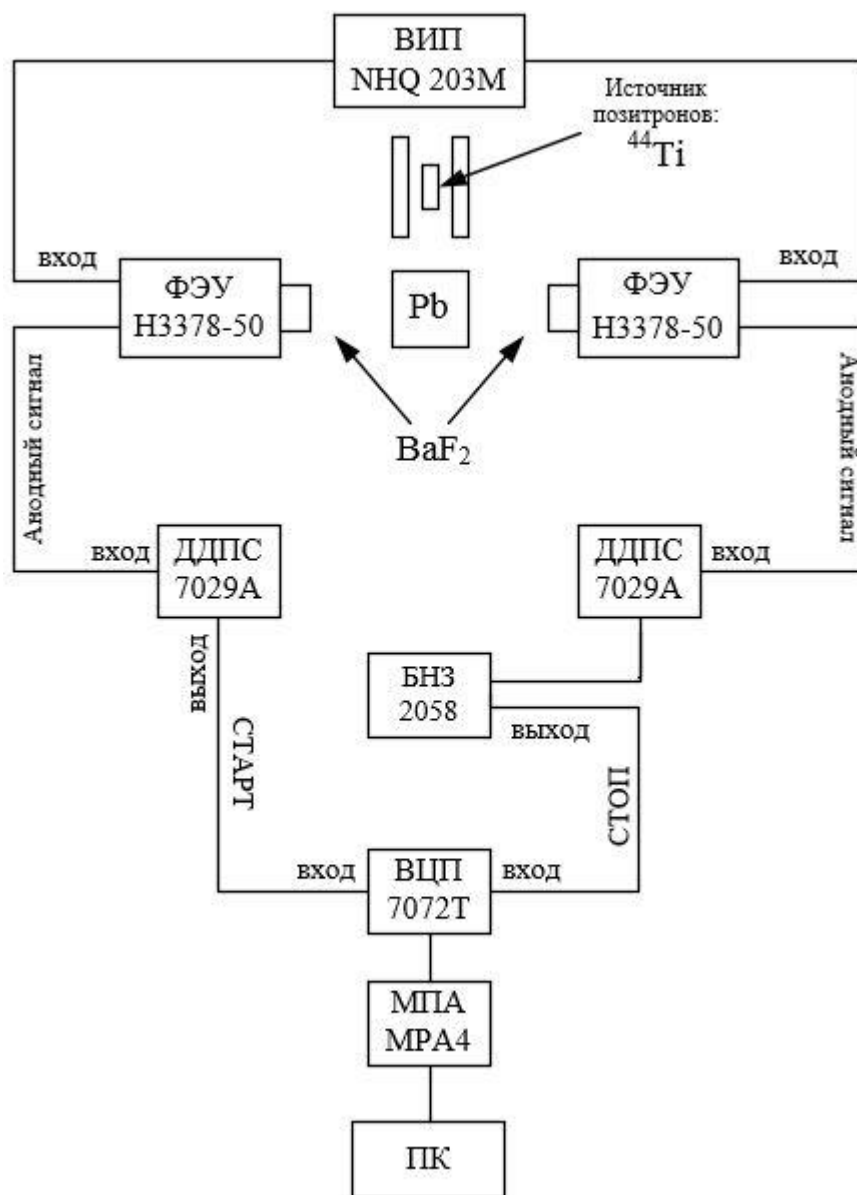


Рисунок 6 – Схема спектрометра времени жизни позитронов: ВИП – высоковольтный источник питания, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, ДПС – дискриминатор постоянной составляющей, БНЗ – блок наносекундной задержки, ВЦП – время-цифровой преобразователь, МПА – многопараметровый анализатор, ПК – персональный компьютер.

В качестве источника позитронов используется радиоактивный изотоп  $^{44}\text{Ti}(\beta^+, \gamma)$ . Радиоизотопный источник на основе  $^{44}\text{Ti}$  хорошо подходит как для исследований методом ДУАЛ, так и для СВЖП, так как почти в одно время с позитроном испускается реперный  $\gamma$ -квант имеющий энергию 1,157 МэВ. Источник позитронов располагается между двумя образцами материала,

образуя «сэндвич – геометрию». Основное преимущество данной геометрии в том, что позитроны эмитируемые источником непосредственно проникают в образец, что позволяет проводить измерения на воздухе.

Питание сцинтилляционных детекторов производится высоковольтным источником питания. Регистрируются  $\gamma$ -кванты при помощи двух сцинтилляционных детекторов на основе фотоэлектронных умножителей и сцинтилляторов  $\text{BaF}_2$ . События, которые соответствуют образованию  $\gamma$ -кванта, являются сигналами «старт» и регистрируются первым детектором, а «стоповым» сигналом является промежуток времени между моментом регистрации соответствующих  $\gamma$ -квантов, осуществляемый вторым детектором. Все импульсы зарегистрированные детекторами направляются на дифференциальные дискриминаторы, где происходит фиксирование момента регистрации события и разделение поступивших сигналов, которые различаются друг от друга амплитудой [31]. Анодный сигнал с детектора «старт» направляется на ДДПС, на котором установлены пороги дискриминации, чтобы не захватывать область аннигиляционного пика с энергией 0,511 МэВ. На другом дифференциальном дискриминаторе сигнал с анода от детектора «стоп» пороги дискриминации на нем устанавливаются так, чтобы произвести отбор импульсов, соответствующих реперным  $\gamma$ -квантам с энергией 1,157 МэВ.

С первого дифференциального дискриминатора импульсы поступают на стартовый вход время – цифрового преобразователя, а со второго дискриминатора «стоп» – импульсы проходят через блок наносекундной задержки (БНЗ) и подаются на стоповый вход ВЦП. Таким образом, осуществляется измерение промежутка времени между реперным (1,157 МэВ) и аннигиляционным (0,511 МэВ)  $\gamma$ -квантами. Для набора спектра временного распределения сигналы с ВЦП поступают на блок МПА со специальным программным обеспечением.

## 2.2.1 Описание конструкции спектрометра

В ниже описанных пунктах приведено описание блоков спектрометра и схем отдельных узлов. Спектрометр состоит из следующих элементов:



Рисунок 7 – Многопараметровый многоканальный анализатор



Рисунок 8 – Устройство спектрометра: А – высоковольтный источник питания, Б – дифференциальный дискриминатор, В – блок наносекундной задержки, Г – время-цифровой преобразователь.



### 2.2.1.1 Высоковольтный источник питания

Для питания спектрометров широко применяются импульсные модуляторы. Основная особенность схем модуляторов – применение вторичных источников электропитания с напряжением, равным амплитуде выходного импульса, т.е. высоковольтных источников питания. Источники питания используются в качестве источников постоянного напряжения. В данных устройствах есть возможность контролировать выходные сигналы, т.е. выходное напряжение и выходной ток [32].

В схеме применяется источник питания модели FAST ComTec NHQ 203M. Данная модель ВИП представляет собой двухканальную высоковольтную версию крейта NIM. Современные принципы связи в сочетании с новейшими технологиями производства SMT позволяют разрабатывать и изготавливать очень компактные источники высокого напряжения с хорошими характеристиками. Все модели NHQ имеют одиночную ширину, а также есть возможность ручного управления и работа через интерфейс RS232.

Даже при максимальной нагрузке высоковольтные источники обеспечивают высокие выходные напряжения вместе с очень низкой пульсацией и шумом. Аппаратные переключатели позволяют устанавливать пределы напряжения и тока в 10% шаге. Вход INHIBIT обеспечивает мгновенное завершение работы для защиты чувствительных детекторов. Кроме того, максимальный выходной ток на канал устанавливается через интерфейс. Высоковольтные выходы защищены от перегрузки и короткого замыкания. Полярность выходного сигнала может быть выбрана с помощью ручных поворотных переключателей. Выходное напряжение также может быть установлено с помощью программного обеспечения через интерфейс RS232C. Выбранная полярность отображается на передней части панели ЖК–дисплея.

Для эффективной защиты подключенных устройств максимальное выходное напряжение и ток могут выбираться с шагом 10% при помощи

поворотных переключателей. Выходное напряжение или ток, которые превышают установленный предел, сигнализируется красным светодиодом на передней панели.

### 2.2.1.2 Блок сцинтилляционных детекторов

Детекторы являются основным узлом в устройстве для определения временного разрешения спектрометра. В спектрометре применяется два абсолютно одинаковых по конструкции блока детекторов, которые состоят из сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Сцинтиллятор – это вещество, которое обладает способностью излучать вспышку света в том случае, когда происходит поглощение ионизирующего излучения ( $\gamma$ -квантов). Сцинтилляционный детектор выполнен из сцинтиллятора, где ионизирующие частицы излучают вспышку света и ФЭУ который преобразует вспышку света в импульс электрического тока [33].

В данной схеме используется два сцинтилляционных детектора Hamamatsu H3378-50 на основе кристаллов  $BaF_2$ . Кристаллы фторида бария занимают особое место в физике ядерных излучений. Данные сцинтилляторы используются в устройствах обладающие большой скоростью счета событий. Такие сцинтилляторы особенно важны в устройствах с высокой скоростью счета событий, а также для улучшения работы блока детектирования спектрометра [31]. В наши дни кристаллы  $BaF_2$  во многих параметрах превосходят сцинтилляторов выполненных на основе пластика, также данный кристалл обладает хорошими характеристиками: высокая скорость высвечивания и хорошее энергетическое разрешение. Энергетический спектр со сцинтилляционных детекторов  $BaF_2$  приведен на рисунке 9 [29].

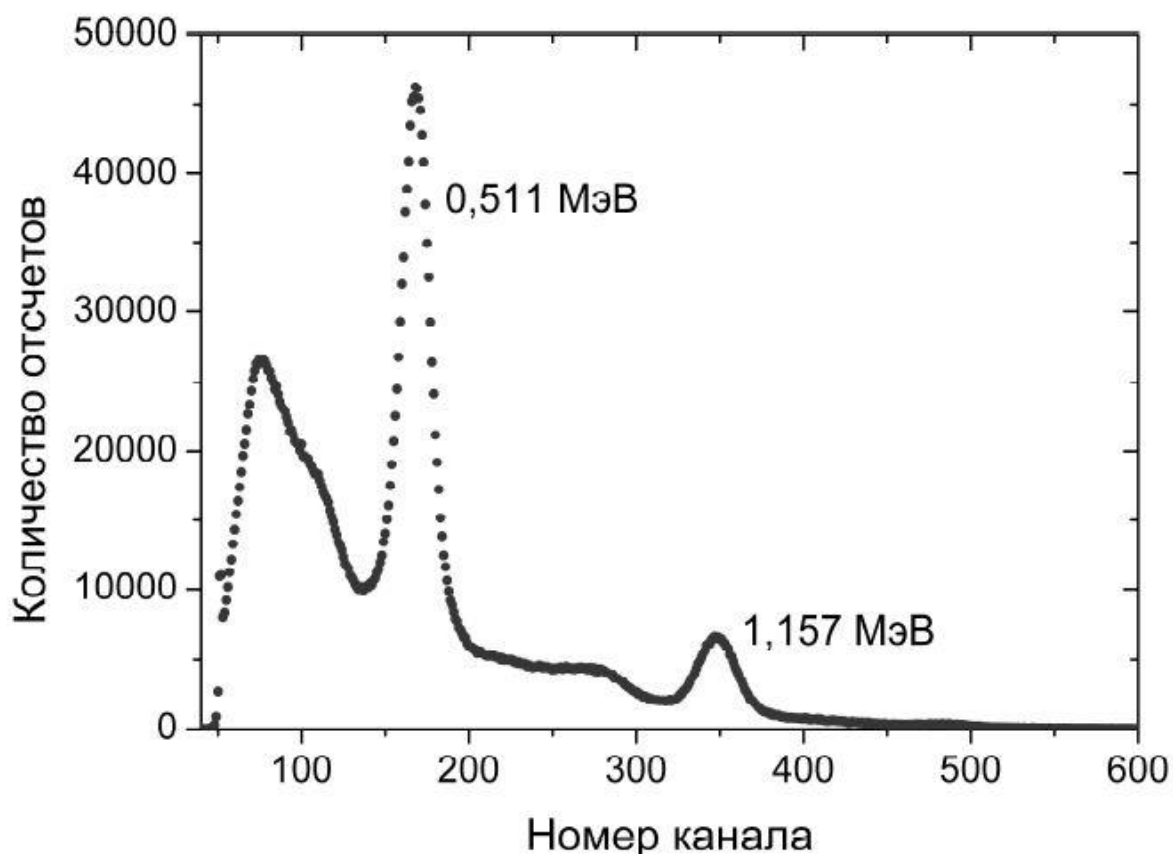


Рисунок 9 – Энергетический спектр на основе сцинтиллятора BaF<sub>2</sub>

На полученном энергетическом спектре превосходно видны пики аннигиляционных  $\gamma$ -квантов (0,511 МэВ) и реперных  $\gamma$ -квантов (1,157 МэВ). Вследствие этого процесс настройки порогов дискриминации на дискриминаторах будет значительно легче. Для уменьшения количества ложных срабатываний дискриминатора от импульсов с другими энергиями, в схеме установки установлены два дифференциальных дискриминатора.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – это электровакуумное устройство, где поток электронов, который эмитируется фотокатодом под действием оптического излучения. Вследствие этого происходит усиление частиц в умножительной системе из-за вторичной электронной эмиссии. Первоначальный фототок значительно меньше, чем ток в цепи анода. На рисунке 10 представлена схема ФЭУ с присоединенным сцинтиллятором.

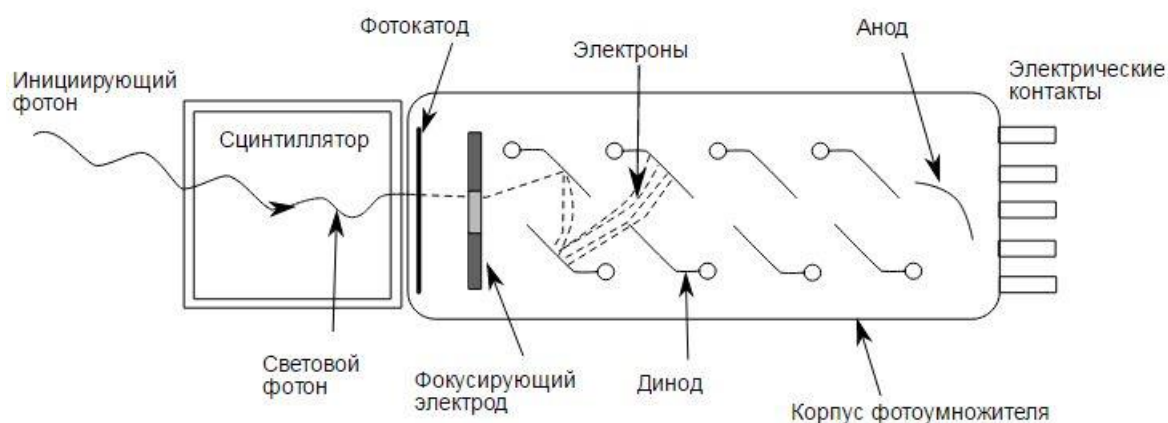


Рисунок 10 – Схема фотоэлектронного умножителя с присоединенным сцинтиллятором [34]

Строение фотоэлектронного умножителя представляет собой входную камеру, умножительную динодную систему, анода и дополнительных электродов. Прибор выполнен в форме баллона в вакуумном корпусе, в котором имеется стеклянное или кварцевое окно, через которое свет попадает на фоточувствительный элемент – фотокатод. Фотокатод в свою очередь испускает электроны, а они умножаются в специальных электродах именуемых динодами. В конце динодной цепи находится анод или собирательный электрод. Ток, идущий через анод пропорционален фототоку генерируемому фотокатодом. К характеристикам фотоэлектронного умножителя, во многом зависящим от структуры фотокатода относятся: спектральная чувствительность, квантовая эффективность, темновой ток или шумы. Толщина фотокатода является важным параметром. Чем больше толщина фотокатода, тем больше фотонов поглотится при меньшем количестве эмитированных электронов. Чем меньше фотокатодный слой, тем больше фотонов пройдет сквозь него без поглощения. Электроны, проходящие через фотокатод, ускоряются динодной цепочкой. Очень часто используются фокусирующие электроды, которые направляют все фотоэлектроны, исходящие от фотокатода на первый динод. Когда фотоэлектрон попадает на первый динод, он вызывает вторичную электронную эмиссию, увеличивая свою кратность, все они ускоряются по динодной цепочке от одного динода к следующему. Умножение

зависит от напряжения между динодами и общим количеством динодов [11,14,34].

В таблице 3 приведены основные характеристики фотоэлектронного умножителя Hamamatsu H3378-50.

Таблица 3 – Основные характеристики ФЭУ [8]

Заводской номер модели	H3378-50
Тип	Быстрый ФЭУ
Размер	51 мм
Эффективная область	46
Тип катода	Двухщелочной
Пиковая длина волны	420 нм
Пиковая излучательная чувствительность	80 мА/В
Материал входного окна	Кварцевое стекло
Минимальная длина волны	160 нм
Максимальная длина волны	650 нм
Чувствительность фотокатода к световому потоку	80 мкА/лм
Анодная чувствительность к световому потоку	200 А/лм
Коэффициент усиления	$2,5 \cdot 10^6$
Темновой ток	100 мВ
Время нарастания сигнала	0,7 нс
Структура динодов / Число уровней	Линейная / 8

### 2.2.1.3 Дифференциальный дискриминатор

В данной схеме применяются два дифференциальных дискриминатора (FAST ComTec model 7029A). Дискриминатор на выходе выдает сигнал от импульсов, амплитуда которых лежит в заданных пределах. В этом устройстве

есть два порога дискриминации – нижний и верхний. Ширина окна – это разница между двумя порогами. Важной характеристикой дискриминатора является входная чувствительность, т.е. номинальное напряжение входного сигнала. Для того чтобы улучшить временное разрешение спектрометра, нужно максимально уменьшить количество ложных срабатываний дифференциальных дискриминаторов от импульсов, энергия которых не соответствует значениям аннигиляционного и ядерного  $\gamma$ -кванта. На рисунке 11 представлен энергетический спектр с порогами дискриминации.

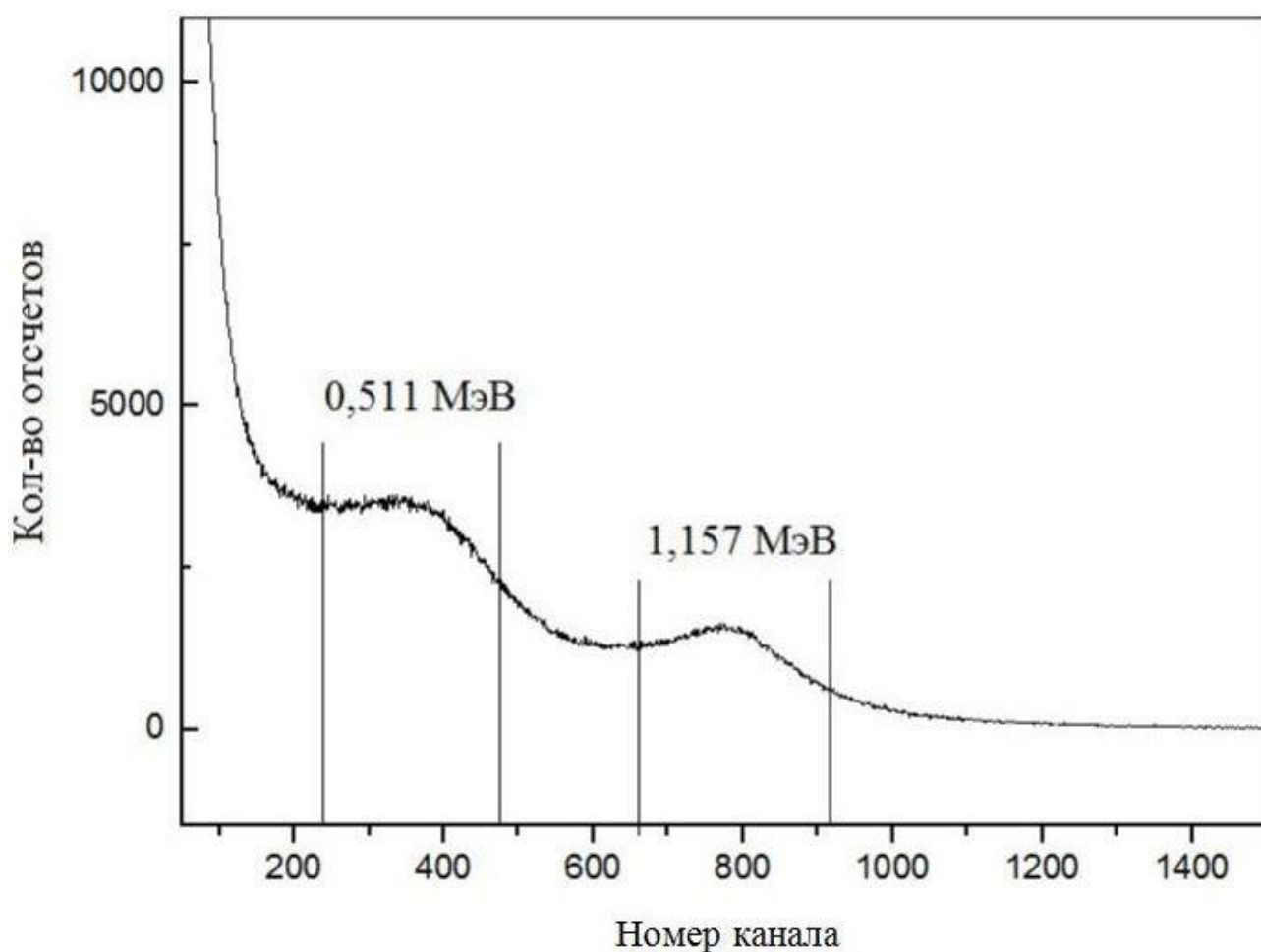


Рисунок 11 – Энергетический спектр с настроенными порогами дискриминации

Модель 7029А может одновременно использоваться как обычный дискриминатор постоянной фракции и как дифференциальный дискриминатор фракции с настройками верхнего и нижнего уровня, которые позволяют установить диапазоны из которых необходимо вывести временной сигнал.

Устройство обеспечивает оптимальное временное разрешение для многих типов детекторов [35].

#### 2.2.1.4 Блок наносекундной задержки

В данном спектрометре используется блок наносекундной задержки фирмы Canberra model 2058. Он представляет собой устройство, не требующее питания, также выполнено в виде модуля NIM одиночной ширины, которое выполняет функцию задержки логических или линейных сигналов в диапазоне от 0,5 нс до 63,5 нс с шагом 0,5 нс. Применяются коаксиальные кабели различной длины, точность задержки составляет 20 пс. Кабели по длине должны быть хорошо откалиброваны, для того чтобы задержку сигнала можно было более точно установить. Необходимость в наносекундной задержке имеет место как логических, так и в линейных цепях, так как задержка сигналов в основном применяется в быстрых логических цепях. На передней части блока 7 переключателей, которые позволяют выбирать время задержки в любой комбинации: 0,5 нс, 1 нс, 2 нс, 4 нс, 8 нс, 16 нс или 32 нс. Высокая степень точности выбора времени задержки – это помощь к калибровке такого оборудования. В таблице 4 представлены основные характеристики блока наносекундной задержки [36].

Таблица 4 – Основные характеристики

Рабочий диапазон	0,5 – 63,5 нс
Рабочий диапазон температуры	0 – 50 °С
Рабочая влажность	От 0 до 80%
Точность задержки	± 20 пс
Размер	3,43 x 22,12 см
Масса	0,8 кг

### 2.2.1.5 Время – цифровой преобразователь

Время – цифровой преобразователь в схеме используется для измерений интервалов времени в различных диапазонах (от нс до пс). Первые ВЦП были разработаны для научных и лабораторных экспериментов, а также для исследовательских целей.

ВЦП модель FAST ComTec dual TADC 7072T представляет собой двухканальное устройство NIM одиночной ширины. Реализуется несколько способов работы: как сверхбыстрый аналого-цифровой преобразователь с фиксированным временем преобразования 500 нс (ADC), время – цифровым преобразователем (TDC) с разрешением  $\ll 25$  пс или режим аналогового дискретного напряжения (SVA). Данная модель 7072T хорошо подходит для счетов с высокой скоростью сигналов в энергетической и временной спектроскопии. Комбинированная функция ADC / TDC находит свое применение во временном разрешении фотонных, ионизирующих, нейтронных и рентгеновских излучений.

Встроенный одноканальный анализатор сигналов имеет отдельный выход на передней части панели. Этот выход может использоваться в режиме ADC и SVA. В режиме SVA при подаче сигнала может быть выбран уровень сигнала или форма волны [37].

### 2.2.1.6 Многопараметровый (многоканальный) анализатор

Многоканальный анализатор импульсов не только производит измерение интервалов времени или амплитуд, а также запоминает и подсчитывает число импульсов, которые удовлетворяют определенным условиям. Многоканальные анализаторы не дают возможности произвести развертку скоростью которой более  $10^7$  канал/сек. Для того чтобы применить метод счета фотонов в наносекундной области, а также повысить скорость необходимо применение метода время – амплитудного преобразования. Данный метод базируется на том, что импульсы фотоэлектронного умножителя



сначала преобразуются в другие импульсы, у которых амплитуда пропорциональна интервалу времени между импульсом ФЭУ и импульсом возбуждения, а далее при помощи многоканального анализатора происходит регистрация данных импульсов по амплитуде.

Многопараметровая система сбора данных МРА4 используется в данной работе. Система спроектирована как сверхбыстрая система с входными портами (8 портов). В устройстве 16-разрядные порты могут быть объединены в 32-ух или даже 64-разрядные порты [38].

Данный анализатор применяется для:

- а) сбора данных в режиме сверхбыстрого однопараметрического режима
- б) сверхскоростного обнаружения и отображения сразу нескольких спектров

### Глава 3. Экспериментальные результаты

В процессе исследования использовались образцы различных металлов, в ниже приведенной таблице описаны режимы отжига стандартных образцов. Данные образцы были подвергнуты шлифованию при помощи шлифовальной бумаги, а также были отполированы для удаления поверхностных дефектов. Для снятия внутренних напряжений и удаления дефектов образцы были подвергнуты отжигу.

Таблица 5 – Режимы отжига

Металл	Температура, °С	Время, час
Алюминий	500	1
Титан	900	2
Железо	900	2
Никель	900	2
Медь	850	2
Цинк	250	1
Цирконий	900	2
Олово	200	1
Свинец	250	1

#### 3.1 Обработка спектров временного распределения аннигиляции позитронов (ВРАП)

Для каждого материала были набраны временные спектры со статистикой  $5 \cdot 10^6$ . Для набора необходимой статистики потребовалось около суток на один спектр. Было набрано в 1 серии 9 спектров. Геометрия образцов была представлена в виде так называемой «сэндвич» структуры, т.е. (образец – источник позитронов  $^{44}\text{Ti}$  – образец). При наборе экспериментальных спектров было получено 3 серии спектров с использованием трех источников позитронов с различной активностью. Описание источников приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Источники позитронов

	Источник № 2/13	Источник № 1/13	Источник № 02/09
Радионуклид	Ti-44	Ti-44	Ti-44
Активность	67,5 мкКи (2,50 МБк)	34,4 мкКи (1,27 МБк)	24,5 мкКи (0,91 МБк)
Загрязненность поверхности источника радиоактивными веществами не превышает	185 Бк	185 Бк	4,1 Бк
Гарантийный срок	2 года	2 года	1 год
Назначенный срок службы	5 лет	5 лет	
Материал капсулы	Ti марки BT1-0	Ti марки BT1-0	Ti
Материал выходного окна	Ti (10 мкм толщиной)	Be (10 мкм толщиной)	Ti марки BT1-0
Габаритные размеры источника, мм:			
Диаметр	10	10	10
Высота	0,2	0,2	0,4
Диаметр активной части	5	5	6

Обработка экспериментальных спектров производилась при помощи программного обеспечения LT10 [39]. Временные спектры (рисунок 12) были обработаны с помощью мультиэкспоненциальной модели [40].

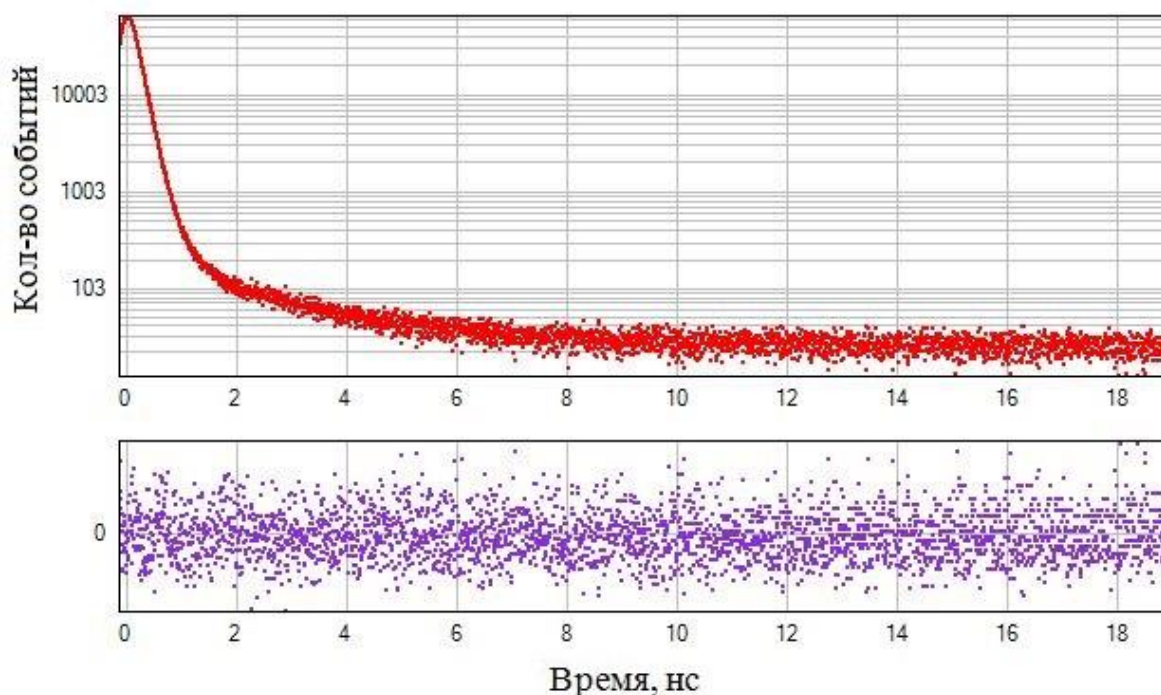


Рисунок 12 – Временной спектр образца титана

Суть обработки заключается в аппроксимации экспериментального спектра математической моделью. Функция Гаусса является математической моделью, которая состоит из нескольких экспоненциальных компонент, которые соответствуют различным значениям времени жизни позитрона в исследуемом образце. В результате обработки экспериментальный спектр раскладывался на 4 компоненты, которые соответствуют аннигиляции позитронов в образце, в соли источника позитронов, в титановой капсуле источника, а также компонента, которая связана с аннигиляцией ортопозитрония. Экспериментальный спектр титана раскладывался на 3 компоненты: компонента аннигиляции в образце + титановая капсула (так как эти компоненты характеризуются одним и тем же временем жизни), компонента соли и ортопозитрония.

### 3.2 Результаты обработки экспериментальных спектров

Экспериментальные значения времени жизни позитронов в объеме образцов после обработки временных спектров в пакете программ LT10 [41] были получены следующие результаты, которые представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты обработки

Спектр	Порядковый номер	Время жизни позитронов (экспериментальное), пс			Время жизни позитронов (теоретическое) [42], пс
		Источник № 2/13	Источник № 1/13	Источник № 02/09	
Al	13	169,2±0,2	169,6±0,1	170,5±0,2	165
Ti	22	146,1±0,1	149,1±0,7	149,2±0,1	150
Fe	26	108,6±0,7	108,3±0,1	111,1±0,1	111
Ni	28	104,5±0,5	105,2±0,1	108,1±0,1	109
Cu	29	115,7±0,5	117,5±0,1	120,2±0,1	120
Zn	30	149,5±0,3	153,8±0,1	155,6±0,1	153
Zr	40	157,9±0,5	164,9±0,1	165,4±0,1	164
Sn	50	198,7±0,2	202,4±0,1	194,6±0,2	200
Pb	82	202,3±0,6	214,4±0,2	210,8±0,1	204

Таким образом, можно построить графики зависимости времени жизни позитронов от атомного номера химического элемента.

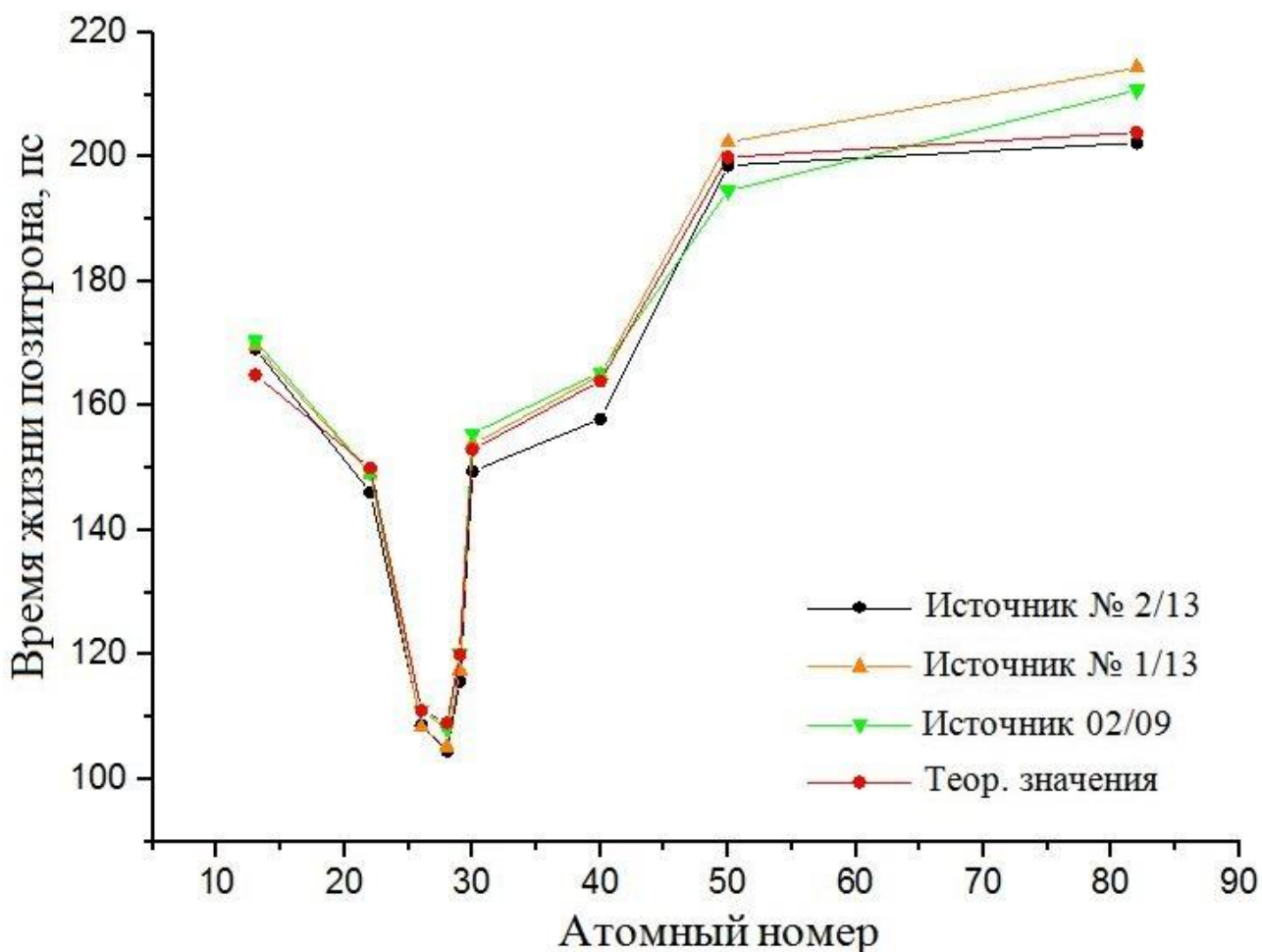


Рисунок 13 – Зависимости времени жизни позитрона в материале от атомного номера

Полученные временные компоненты с применением различных источников позитронов соответствуют аннигиляции позитронов в объеме исследуемого образца. Временные значения полученные в эксперименте хорошо согласуются с теоретическими значениями, которые представлены в работе [42], это говорит о том, что модуль временного распределения аннигиляции позитронов работает корректно.

Таблица 8 – Вклад источника позитронов и разрешение спектрометра

Спектр	Порядковый номер	Вклад источника позитронов, %			Разрешение спектрометра, пс		
		Источник № 2/13	Источник № 1/13	Источник № 02/09	Источник № 2/13	Источник № 1/13	Источник № 02/09
Al	13	17,7±0,2	17,9±0,2	16,8±0,3	235,3±0,1	241,6±0,2	239,8±0,1
Fe	26	20,9±0,1	19,5±0,1	21,6±0,1			
Ni	28	21,8±0,1	21,9±0,1	21,7±0,1			
Cu	29	22,4±0,1	22,1±0,1	22,3±0,1			
Zn	30	21,5±0,1	20,1±0,2	21,2±0,1			
Zr	40	24,4±0,1	22,3±0,2	22,4±0,3			
Sn	50	25,9±0,3	23,4±0,2	23,9±0,2			
Pb	82	29,3±0,3	24,8±0,3	26,1±0,2			

Как видно из таблицы 8, вклад источника позитронов во временной спектр меняется в диапазоне от 17 до 30% в зависимости от исследуемого образца, так как каждый материал имеет определенную атомную массу. В том случае, когда исследовали титан, можно заметить что вклад источника позитронов значительно уменьшается по сравнению с другими образцами. Это связано с тем что, материал капсулы источника, который вносит значительный вклад в компоненту источника, совпадает с материалом исследуемого образца, и разделить их во время обработки невозможно.

Из данной таблицы видно, что среднее разрешение спектрометра с применением различных источников на исследуемых образцах составило 238 пс. В источнике № 2/13 для приведенных в таблице элементов периодической таблицы разрешение равно 235 пс, в источнике № 1/13 разрешение равно 242 пс, а в источнике № 02/09 равно 240 пс.

Таким образом, можно построить графики зависимости вклада источника позитронов от атомного номера химического элемента, полученные аппроксимацией методом наименьших квадратов.

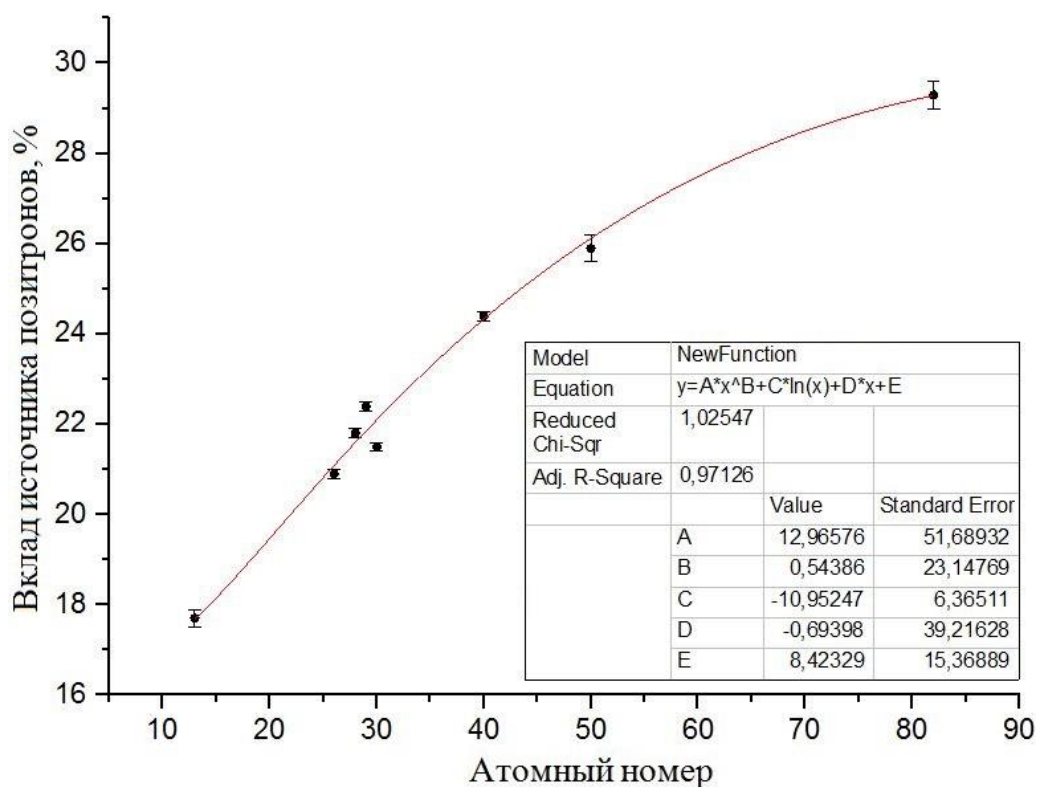


Рисунок 14 – Зависимость вклада источника позитронов от атомного номера (источник позитронов № 2/13)

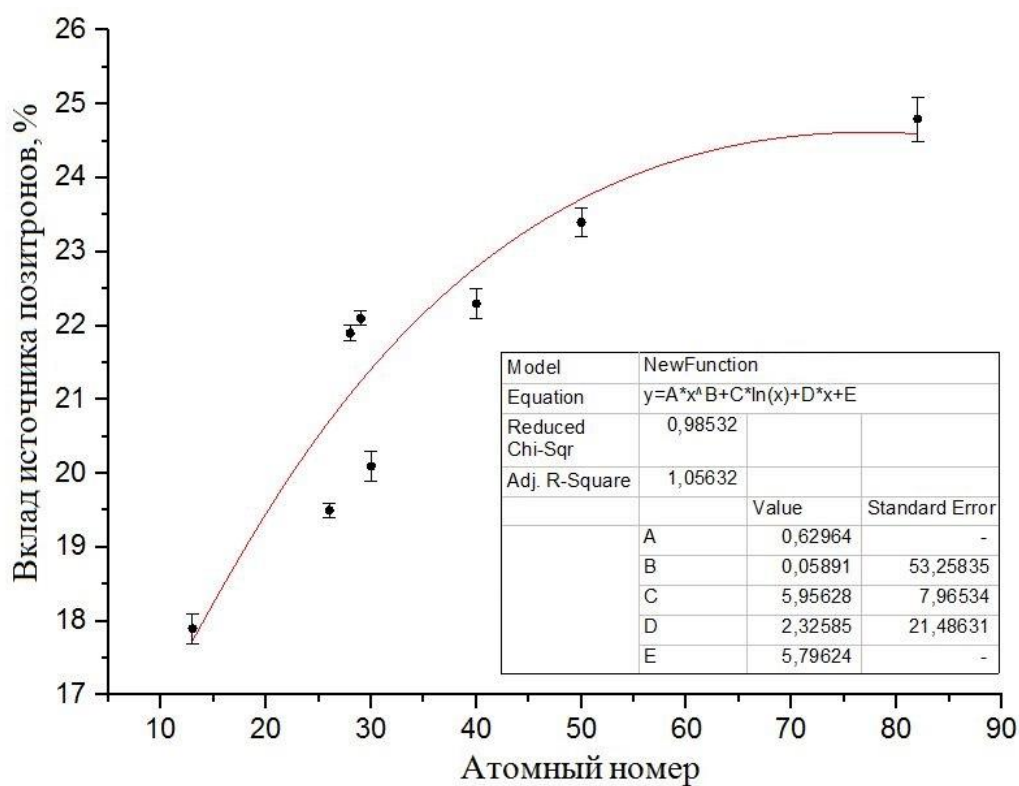


Рисунок 15 – Зависимость вклада источника позитронов от атомного номера (источник позитронов № 1/13)

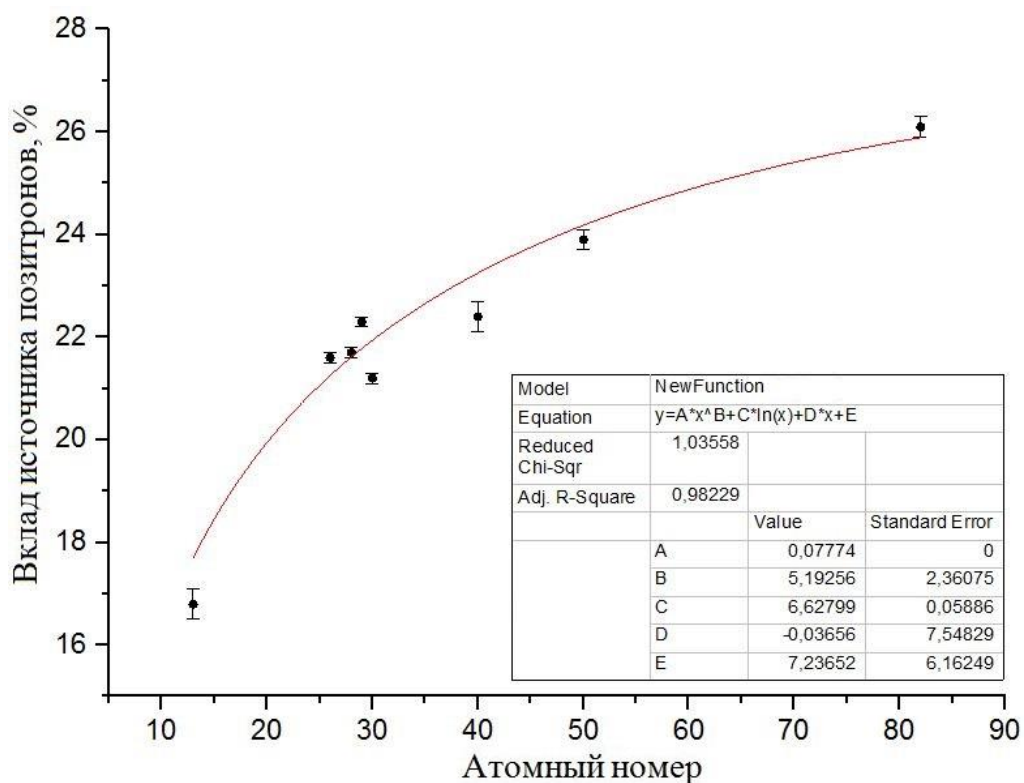


Рисунок 16 – Зависимость вклада источника позитронов от атомного номера (источник позитронов № 02/09)

Из приведенных выше графиков можно сделать вывод о том что, с увеличением атомного номера в периодической таблице можно наблюдать, что вклад источника позитронов возрастает. Это связано с тем что, чем больше атомный номер элемента, следовательно, масса образца будет больше, поэтому при столкновении с более тяжелым по массе образцом часть позитронов будет переотражаться обратно в источник.

Аппроксимация графиков зависимости вклада источника позитронов от атомного номера химического элемента производилась в программе ORIGIN [43]. После аппроксимации графиков были рассчитаны коэффициенты A, B, C, D, E с помощью функции описанной в работе [44]:

$$y = A \cdot z^B + C \cdot \ln(z) + D \cdot z + E, \quad (11)$$

где E – доля позитронов, аннигилирующих в материале источника в зависимости от атомного номера, z – атомный номер.



## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для введения результатов выпускной квалификационной работы на тему «Спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время – цифрового преобразователя» на целевой рынок, необходимо произвести анализ потребителей результатов исследования и в свою очередь выявить сегмент рынка.

Для выявления определенной части рынка или группы потребителей, обладающих определенными общими признаками, необходима реализация сегментирования, то есть формирование определенных групп, испытывающих необходимость в данном товаре. Данный научно-исследовательский лабораторный спектрометр применяется для набора экспериментальных спектров, а также для анализа структурных дефектов, в частности метода спектроскопии по времени жизни позитронов. Спектрометр, который был реализован на кафедре общей физики ФТИ ТПУ, применяется для научно-исследовательских работ, которые проводятся на кафедре ОФ.

Электрон – позитронная аннигиляция изучалась в 40-е и 50-е годы, а экспериментальные методы были разработаны в конце 1960-х годов. Было установлено, что позитроны чувствительны к дефектам кристаллической решетки в металлах. В настоящее время спектроскопия аннигиляции позитронов применяется приблизительно в 200 исследовательских лабораториях по всему миру.

### **4.2 Анализ конкурентных технических решений**

Для успешного выхода на рынок, необходимо проводить систематический анализ конкурирующих товаров, так как новые разработки постоянно пребывают с течением определенного промежутка времени.

Результатом анализа конкурирующих товаров являются важные коррективы и поправки, вносимые в научное исследование, с целью постоянного повышения спроса и преимущества на рынке. Рассматривая данный анализ со стороны ресурсоэффективности и ресурсосбережения, следует ряд оценок сравнительной эффективности научной разработки и определение ее развития и конкурентоспособности в будущем.

В качестве конкурентов можно выбрать два метода электрон-позитронной аннигиляции для исследования различных материалов:

- а) метод временного распределения аннигиляционных фотонов (К1);
- б) метод доплеровского уширения аннигиляционной линии (К2).

Для выполнения данного анализа воспользуемся оценочной картой, приведенной в таблице 9.

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4	3	0,6	0,6	0,45
2. Энергоэкономичность	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Надежность	0,15	5	5	5	0,75	0,75	0,75
4. Уровень шума	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
5. Безопасность	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
6. Потребность в ресурсах памяти	0,1	3	4	5	0,3	0,4	0,5
7. Простота эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
8. Качество интеллектуального интерфейса	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
<b>Итого:</b>	1	32	30	29	4,1	3,9	3,7

Рассматривая полученные результаты можно сделать вывод о том, что разрабатываемая лабораторная установка является конкурентоспособной. Данная установка обладает сильными сторонами, такими как надежность эксплуатации, безопасность и простота эксплуатации. Слабыми сторонами

являются энергоэкономичность, уровень шума, потребность в ресурсах памяти и качество интеллектуального интерфейса. Для устранения слабых сторон необходимо производить более глубокие исследования установки, а также разрабатывать более подходящие условия обслуживания.

### **4.3 Диаграмма Исикава**

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

Область применения диаграммы:

- а) выявление причин возникновения проблемы;
- б) анализ и структурирование процессов на предприятии;
- в) оценка причинно-следственных связей.

Степень детализации диаграммы (количество факторов и причинно-следственных уровней) определяет разработчик диаграммы. Наклон и размер стрелок не имеют значения.

Пример причинно-следственной диаграммы представлен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Причинно-следственная диаграмма

#### 4.4 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT-анализ помогает составить структурированное описание конкретной ситуации, на основании этого описания можно сделать выводы. Это позволяет принимать правильные и взвешенные решения. SWOT-анализ занимает значительную роль в цикле менеджмента.

Он проводится в несколько этапов.

**Первый этап** заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

**1. Сильные стороны.** Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

**2. Слабые стороны.** Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которое препятствует достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

**3. Возможности.** Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную

позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке? Проводите поиск свободных ниш, но помните, что свободными они остаются недолго. Благоприятная возможность, увиденная сегодня, может перестать существовать уже через три месяца. Благоприятные возможности могут возникать в силу действия следующих факторов:

- изменения в технологической сфере и на рынке – как мирового, так и регионального масштаба;

- изменения правительственной политики в отношении отрасли, где проводится научное исследование;

- изменения социальных стандартов, профиля населения, стиля жизни и т.д.

- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?

- Какие интересные тенденции отмечены?

- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. **Угроза** представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб наносимый проекту.

Рекомендуется результаты этапа SWOT-анализа представлять в табличной форме (таблица 10).

Таблица 10 – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>                      С1. Определение времени жизни позитронов в различных материалах                      С2. Установление структурного состава материала                      С3. Облегченное проведение измерений на воздухе                      С4. Применение радиоактивных источников позитронов с различной радиоактивностью</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>                      Сл1. Отсутствие устройств подавляющих шумы                      Сл2. Требуется много времени для набора экспериментального спектра                      Сл3. Средняя степень радиационной безопасности</p>
<p><b>Возможности:</b>                      В1. Определение размера структурного дефекта                      В2. Получение информации о качественном изменении структуры материала, а также химическом составе в местах аннигиляции позитронов                      В3. По времени жизни позитрона можно судить о материале, располагающемся между детекторами</p>	<p>– неразрушающий метод, способный детально исследовать не только вакансионные, но и водородно-вакансионные комплексы                      – использование двух методов ЭПА одновременно (ВРАФ и ДУАЛ) для исследования временного и импульсного распределения аннигиляции позитронов</p>	<p>– возможность проводить лабораторные исследования только в специальных местах с спец. оборудованием                      – возможность исследовать материалы для которых есть табличные значения времени жизни позитронов</p>
<p><b>Угрозы:</b>                      У1. Наличие в спектре времени жизни позитронов большого числа фоновых событий                      У2. Радиационная опасность                      У3. Низкая скорость набора экспериментального спектра                      У4. Требование дополнительных устройств (детекторы, усилители, дискриминаторы)</p>	<p>– использование более радиоактивного источника (с большей активностью) для исследования различных материалов                      – оптимизация скорости счета событий в спектре</p>	<p>– применение программного обеспечения с более усовершенствованным интерфейсом                      – покупка нового оборудования (детекторы, сцинтилляторы) для повышения скорости счета</p>

#### 4.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения или завершения. Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	4
3.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
4.	Определены пути продвижения научной разработки	2	3
5.	Разработана стратегия реализации научной разработки	4	4
6.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
7.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	5
8.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	<b>24</b>	<b>27</b>

Из данной таблицы можно сделать вывод о том, что разработка научного исследования является перспективной только для научных целей, а также уровень имеющихся знаний у специалистов достаточно высок.



Выбор метода коммерциализации объекта исследования и обоснование его целесообразности в данной работе:

1. *Организация совместного предприятия*, то есть объединение двух и более лиц для организации предприятия.

Вследствие этого, методом ВРАФ занимаются только некоторые российские научные лаборатории, с помощью которого можно решить актуальные проблемы исследования поверхности материала.

#### **4.6 Инициация проекта**

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, а также влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес – потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

**1. Цели и результат проекта.** В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.д. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена ниже.

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
Кафедра общей физики ТПУ	Разработка более модернизированного устройства с большой скоростью счета для набора спектров
Другие университеты различных городов	Получение методики для исследования материалов

**2. Организационная структура проекта.** На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 12.

Таблица 12 – Рабочая группа проекта

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>	<b>Трудо-затраты, час.</b>
1	Лаптев Р.С. Ассистент каф. ОФ, к.ф.-м.н.	Научный руководитель проекта	- Руководство проектом - Сбор экспериментальных данных	176
2	Быстров А.С. Студент группы 0Б31	Исполнитель проекта	- Знакомство с установкой - Набор экспериментальных спектров - Обработка экспериментальных данных	128
<b>ИТОГО:</b>				<b>304</b>

#### **4.7 План проекта**

В целях планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики при помощи диаграммы Ганта. Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), которые используются для

иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. В таблице 13 приведена диаграмма Ганта.

Таблица 13 – Календарный план-график проведения НИОКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Постановка задачи и целей дипломного проекта, принятие задания к выполнению	НР, И	6	■													
2	Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	10	■	■												
3	Выявление причины проблемы и выбор направления исследования	НР, И	8		■	■											
4	Знакомство с установкой	НР	14			■											
5	Чтение литературного обзора про установку	И	6				■										
6	Подготовка образцов	НР	14					■									
7	Набор экспериментальных спектров	И	6					■	■								
8	Обработка спектров по времени жизни позитронов	НР	14						■								
9	Построение графиков в пакете Origin	И	6								■						
10	Разработки технологического процесс изготовления и методики выполнения работ	НР, И	15									■	■				
11	Оформление пояснительной записки и подготовка к защите	НР, И	7												■	■	

■ - инженер (И)

■ - руководитель (НР)

#### 4.8 Бюджет научного исследования

В данном подразделе включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 14 – Расчет затрат по статье «Электроэнергия на спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Время работы $t_{об}$ (ч)	Потребляемая мощность $P_{об}$ (кВт)	Цена единицы оборудования, $C_p$ (кВт/ч);	Затраты на электроэнергию, руб.
1.	Высоковольтный источник питания	360	0,03	5,8	63
2.	Полупроводниковый детектор (2 шт.)	360	0,05		209
3.	Дифференциальный дискриминатор (2 шт.)	40	0,04		19
4.	Блок наносекундной задержки	5	0,02		1
5.	Время – цифровой преобразователь	285	0,03		50
6.	Многопараметровый анализатор	360	0,25		522
7.	Персональный компьютер	377	0,3		656
	<b>Итого</b>	<b>2267</b>	<b>0,72</b>		<b>1520</b>

Следовательно общая сумма затрат за электроэнергию составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{электр.}} = 1520 \text{ руб.}$$

Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во	Срок службы элемента	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Амортизация за 3 месяца, тыс. руб.
1.	Детекторы	2	5	1500	3000	150
2.	Дискриминатор	2	5	100	200	10
3.	Персональный компьютер	1	5	35	35	1,75
	<b>Итого</b>					<b>161 750</b>

$$\mathcal{E}_{\text{амортизация}} = 161\,750 \text{ тыс. руб.}$$

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во	Цена единицы оборудования, руб	Общая стоимость оборудования, руб.
1.	Время - цифровой преобразователь	1	21000	21000
2.	Блок задержки	1	8200	8200
3.	Источник питания	1	5 700	5 700
	<b>Итого</b>			<b>34900</b>

$\mathcal{E}_{\text{спец.оборуд}} = 34900$  руб.

$\mathcal{E}_{\text{общ.}} = \mathcal{E}_{\text{электр.}} + \mathcal{E}_{\text{амор.}} + \mathcal{E}_{\text{спец.оборуд}} = 1520 + 161\,750 + 34900 = 198\,170$  руб.

#### 4.9 Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, включая премии, доплаты и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;  $T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 15).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени	48	48
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p,$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;  $k_{пр}$  – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	20800	0,3	0,2	1,3	40560	1680	88	147840
Инженер	9893	0,3	0,2	1,3	19291	861	64	55104
<b>Итого</b>								<b>202944</b>

## **Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала**

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15);  $З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Таблица 17 – Заработная плата исполнителей НТИ

<b>Заработная плата</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Основная зарплата	147840	55104
Дополнительная зарплата	22176	8266
Зарплата исполнителя	170016	63370
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	233386	

## **4.10 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб	
	Руководитель	Инженер
1. Материальные затраты НТИ	10205	1426
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	147840	55104
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	22176	8266
4. Затраты на отчисления во внебюджетные фонды	51005	19011
5. Бюджет затрат НТИ	231226	83807
<b>Итого</b>	<b>315033</b>	

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент (равен 0,3) отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.);

$$C_{\text{внеб}} (\text{Руководитель}) = 0,3 \cdot (147840 + 22176) = 51005 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{внеб}} (\text{Инженер}) = 0,3 \cdot (55104 + 8266) = 19011 \text{ руб.}$$

В итоге общие затраты на реализацию научного проекта составили 315033 руб.

#### 4.11 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:



$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

где  $I_{\phi}^p$  – интегральный финансовый показатель разработки;  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения проекта (в том числе аналоги).

Таблица 19 – Стоимости спектрометров

Спектрометр	$\Phi_{pi}$ руб.	$\Phi_{max}$ руб.	$I_{\phi}^p$
ВРАП	510000	990000	0,52
ДУАЛ	480000		0,48

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;  $b_i$  – количественная оценка  $i$ -го параметра в баллах.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Критерий	Весовой коэффициент	Количественная оценка	
		ВРАП	ДУАЛ
Удобство эксплуатации	0,2	5	4
Энергосбережение	0,4	4	4
Надежность	0,25	4	5
Материалоемкость	0,15	3	2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>16</b>	<b>15</b>

Рассчитаем значения коэффициентов ресурсоэффективности:

$$I_{врап} = 0,2 \cdot 5 + 0,4 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 = 4,05;$$

$$I_{дуал} = 0,2 \cdot 4 + 0,4 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 2 = 3,95.$$

Показатель эффективности разработки рассчитывается по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{pi}}{I_{исп.iфинр}},$$

$$I_{вrap} = \frac{4,05}{0,52} = 7,8 - \text{интегральный показатель эффективности};$$

$$I_{дуал} = \frac{3,95}{0,48} = 8,2 - \text{интегральный показатель эффективности}.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{вrap}}{I_{дуал}},$$

$$\mathcal{E}_{ср} = 0,951.$$

Все полученные параметры сравнительного анализа представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Сравнительный анализ спектрометров

Спектрометр	ВРАП	ДУАЛ
Интегральный показатель финансовой эффективности	0,52	0,48
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,05	3,95
Интегральный показатель эффективности	7,8	8,2
Сравнительная эффективность	0,951	

Сравнение показателей эффективностей показывает, что более эффективным устройством является спектрометр ДУАЛ.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест. При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание охране окружающей среды, а в частности, организации безотходного производства. Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций, так как лаборатория находится в Томске, наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является мороз.

### **5.1 Анализ вредных факторов производственной среды**

В лаборатории, где находятся различные лабораторные установки, могут возникнуть следующие факторы: наличие производственного шума, некомфортных метеоусловий, электромагнитного излучения и недостаточной освещенности.

#### **5.1.1 Производственный шум**

Шум – это беспорядочное сочетание различных по частоте и силе звуков, мешающих человеческой деятельности и вызывающих неприятные ощущения. Источниками шума являются колеблющиеся тела, звуковые волны от которых вызывают периодическое повышение или понижение давления воздуха. На эти изменения давления реагируют органы слуха. Ухо человека способно реагировать на изменения от 0 до 140 дБА – эти величины являются пороговыми. Верхний порог слышимости также называют болевым порогом.

Продолжительное воздействие шума может привести к шумовой болезни – заболеванию организма, которое сопровождается поражением органов слуха и центральной нервной системы. Также шум вызывает головную боль, раздражительность, быструю утомляемость, потерю слуха, повышение артериального давления.

Допустимые нормы шума установлены санитарными нормами и представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Допустимые уровни звукового давления

Полоса частот, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления, дБ	107	95	87	82	78	75	73	71	69
Уровни звука, дБА	80								
Эквивалентные уровни звука, дБА	80								

Предельно допустимый уровень шума – это уровень фактора, который при ежедневной работе не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья. Соблюдение предельно допустимого уровня шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

К СКЗ относятся: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

К СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, а также антифоны.

### **5.1.2 Некомфортные метеоусловия**

Микроклимат в производственном помещении включает в себя температуру, относительную влажность и скорость движения воздуха. Неблагоприятные метеоусловия в помещении могут вызвать перенапряжение механизмов терморегуляции, перегрев или переохлаждение организма.

Терморегуляция – это способность организма при изменении микроклиматических условий регулировать теплообмен с окружающей средой, поддерживая температуру тела на постоянном уровне. Регулирование теплообмена осуществляется путем изменения количества вырабатываемого в организме тепла и путем увеличения или уменьшения передачи его в окружающую среду. В комфортных условиях количество вырабатываемого тепла за единицу времени равно отданному теплу. Такое состояние называется тепловым балансом организма.

Организм человека начинает перегреваться или переохлаждаться, если параметры внешней среды отклоняются от комфортных.

Перегрев возникает при повышенной температуре воздуха, которая сопровождается высокой относительной влажностью и низкой подвижностью воздуха. Симптомы перегрева – учащенный пульс, слабость, головная боль, повышение температуры тела, обильное потоотделение.

Переохлаждение может возникать при пониженной температуре в сочетании с высокой влажностью и подвижностью воздуха. В случае

переохлаждения понижается температура тела, сужаются кровеносные сосуды, нарушается работа сердечно-сосудистой системы.

Санитарными нормами микроклимата производственных помещений установлены оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха с учетом тяжести выполняемой работы и периодов года.

В таблице 22 представлены оптимальные параметры микроклимата в производственных помещениях для легкой категории работ, к которой относятся работы, выполняемые сидя и не требующие физического напряжения.

Таблица 22 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Теплый	23-25	40-60	0,1
Холодный	22-24	40-60	0,1

К допустимым микроклиматическим нормам можно отнести параметры, которые способны вызвать изменение теплового состояния организма. При этом не возникает нарушений состояния здоровья, но могут ощущаться дискомфорт, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности. Допустимые нормы устанавливаются в тех производственных помещениях, где по каким-либо причинам невозможно обеспечить оптимальные условия.

### 5.1.3 Электромагнитное излучение

Электромагнитное поле характерно для заряженных частиц. Переносчиком энергии является фотон электромагнитного излучения. Источниками электромагнитного излучения являются компьютеры, телефоны, линии электропередач и так далее. В процессе выполнения данной работы

использовался персональный компьютер для набора экспериментальных спектров, который является источником электромагнитных полей, поэтому необходимо учитывать влияние излучения на организм человека.

Длительное воздействие электромагнитных излучений приводит к нарушениям в центральной нервной и сердечно-сосудистых системах, ломкости ногтей и выпадению волос. Действие электромагнитных полей проявляется в виде быстрой утомляемости, слабости, головной боли, снижения частоты пульса и повышения температуры.

Отрицательное воздействие электромагнитного поля возрастает с повышением частоты, продолжительности и интенсивности излучения. Согласно санитарно-эпидемиологическим правилам оценку электромагнитных полей осуществляют отдельно по напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля. Предельно допустимый уровень напряженности электрического поля на рабочем месте – 5 кВ/м, в случае магнитного поля предельно допустимый уровень определяется в зависимости от того является излучение общим или локальным.

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ:

- средства коллективной защиты от воздействия электромагнитных полей и излучений (уменьшение мощности излучения, экранирование источника излучения и рабочего места, ограничение времени пребывания в зоне излучения).
- средства защиты от электромагнитных излучений — оградительные и герметизирующие устройства, защитные покрытия, устройства автоматического контроля и сигнализации, дистанционного управления, знаки безопасности;

СКЗ – материал защиты: в качестве материала защиты против электромагнитного излучения при работе за компьютером возможно применение очков и специальной одежды, выполненной из металлизированной

ткани (кольчуга), а также при работе с компьютерной мышкой возможно применение нарукавников (перчаток) выполненных из металлизированной сетки. В научной лаборатории используется жидкокристаллический монитор, который не оказывает значительного влияния на организм человека. При работе за компьютером нужно находиться на расстоянии 0,5 м от монитора. Также должна быть отрегулирована яркость экрана, возможно использование специализированных очков.

СИЗ:

Применение средств индивидуальной защиты (СИЗ), которые включают в себя:

- очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани. При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера.

К средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

#### **5.1.4 Освещенность**

Освещение на рабочем месте должно отвечать условиям работы и быть оптимальным по величине, а его спектр должен быть максимально приближен к дневному, лучше всего соответствующему физиологии человека. Слишком высокая освещенность, также как и недостаточная, вызывает быстрое утомление глаз и снижение видимости. Освещение должно быть достаточно равномерным по площади, так как при переводе взгляда с менее освещенных на более освещенные поверхности и наоборот происходит снижение остроты зрения на некоторый промежуток времени. Требования к освещению в производственных помещениях установлены сводом правил.



Оптимальные параметры освещения способствуют повышению работоспособности и оказывают положительное влияние на психологическое состояние человека.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим отраженный от потолка и стен световой поток. Длина помещения  $A = 5,3$  м, ширина  $B = 4,7$  м, высота  $H = 3,5$  м, высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 0,8$  м.

Площадь помещения:

$$S = A \cdot B = 5,3 \cdot 4,7 = 24,91 \text{ м}^2.$$

Недавно побеленные стены с окнами обладают коэффициентом отражения, без штор  $\rho_C = 50\%$ , для потолка недавно побеленного  $\rho_{II} = 70\%$ . При малом выделении пыли в помещении коэффициент запаса равен  $K_3 = 1,5$ . Для люминесцентных ламп характерен коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ .

Для того чтобы обеспечить освещение комнаты с выше указанными параметрами, выберем лампу белого света ЛБ, со световым потоком  $\Phi_{ЛБ} = 2800$  Лм. Светильники длина которых 1227 мм, а ширина – 265 мм, имеем две люминесцентные лампы типа ОДОР-2-40, мощность каждой лампы 40 Вт.

Оптимальное расположение светильников определяется интегральным критерием, то есть величиной  $\lambda$ , значение которой для нашего случая лежит в диапазоне 1,1-1,3. При минимальном значении  $\lambda = 1,1$  и расстоянии светильников от перекрытия  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 0,8 - 0,3 = 2,4 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,4 = 2,64 \text{ м.}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$N_b = B / L = 4,7 / 2,64 \approx 2.$$

Число светильников в ряду:

$$N_a = A / L = 5,3 / 2,64 \approx 2.$$

Таким образом, общее количество светильников будет равно  $N=4$ .

Расстояние от рядов светильников до стены определяется по формуле:

$$l = L / 3 = 2,64 / 3 = 0,88 \text{ м.}$$

На рисунке 18 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

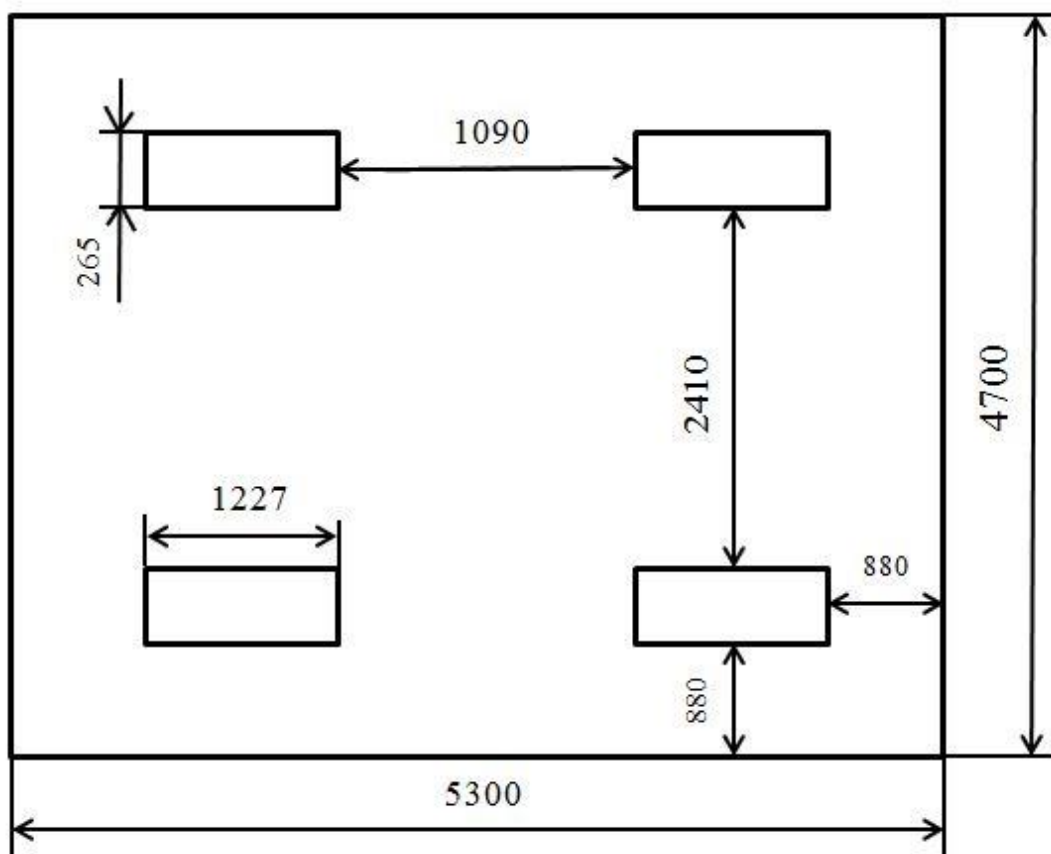


Рисунок 18 – План размещения светильников

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5,3 \cdot 4,7}{2,4 \cdot (5,3 + 4,7)} = 1,04$$

Коэффициент использования светового потока показывает какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\Pi} = 70\%$ , коэффициенте отражения стен  $\rho_C = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,04$  равен  $\eta = 0,42$ .

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 5,3 \cdot 4,7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2 \cdot 4 \cdot 0,42} = 2446 \text{ Лм.}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{2800 - 2446}{2800} \cdot 100\% \leq 20\%$$
$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} = \frac{2800 - 2446}{2800} \cdot 100\% = 12,6\%$$

Таким образом,  $-10\% \leq 12,6\% \leq 20\%$  – необходимый световой поток лампы не выходит за пределы требуемого диапазона.

### 5.1.5 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества (ГОСТ 12.1.009-82. ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения).

Факторами опасного и вредного воздействия на человека, связанными с использованием электрической энергии, являются:

- протекание электрического тока через организм человека;
- воздействие электрической дуги;
- воздействие биологически активного электрического поля;
- воздействие биологически активного магнитного поля;
- воздействие электростатического поля;
- воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ).

Средства индивидуальной защиты от электрических полей:

- защитные пластиковые каски;
- защитные очки;
- щиты ограждения;

- различные респираторы и противогазы;
- рукавицы;
- предохранительные пояса и страховочные канаты.

Средства коллективной защиты от поражения электрическим током:

1. Защитное заземление;
2. Зануление;
3. Защитное отключение;
4. Применение низких напряжений;
5. Двойная изоляция;
6. Оградительное устройство;
7. Сигнализация, блокировка, знаки безопасности, плакаты.

Безопасные номиналы напряжения, тока и сопротивления заземления:

- Напряжение: 12 В (шахты), 36 В (стройка);
- Ток: 0,1 мА;
- Сопротивление: 4 Ом.

## **5.2 Анализ опасных факторов производственной среды**

### **5.2.1 Факторы пожарной и взрывной природы**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 – В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории А<sub>н</sub>, Б<sub>н</sub>, В<sub>н</sub>, Г<sub>н</sub> и Д<sub>н</sub>. Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории «А» повышенная взрыво-пожароопасность – так как лаборатория содержит горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28°С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа, а также вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом, в таком количестве, что

расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа. По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причинами возникновения пожара неэлектрического характера являются халатное неосторожное обращение с огнем. Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и так далее. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- в) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- г) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение

первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу.

На рисунке 19 представлен план эвакуации из лаборатории, находящейся в цокольном этаже. На первом этаже имеется два эвакуационных выхода и один эвакуационный выход есть в цокольном этаже.

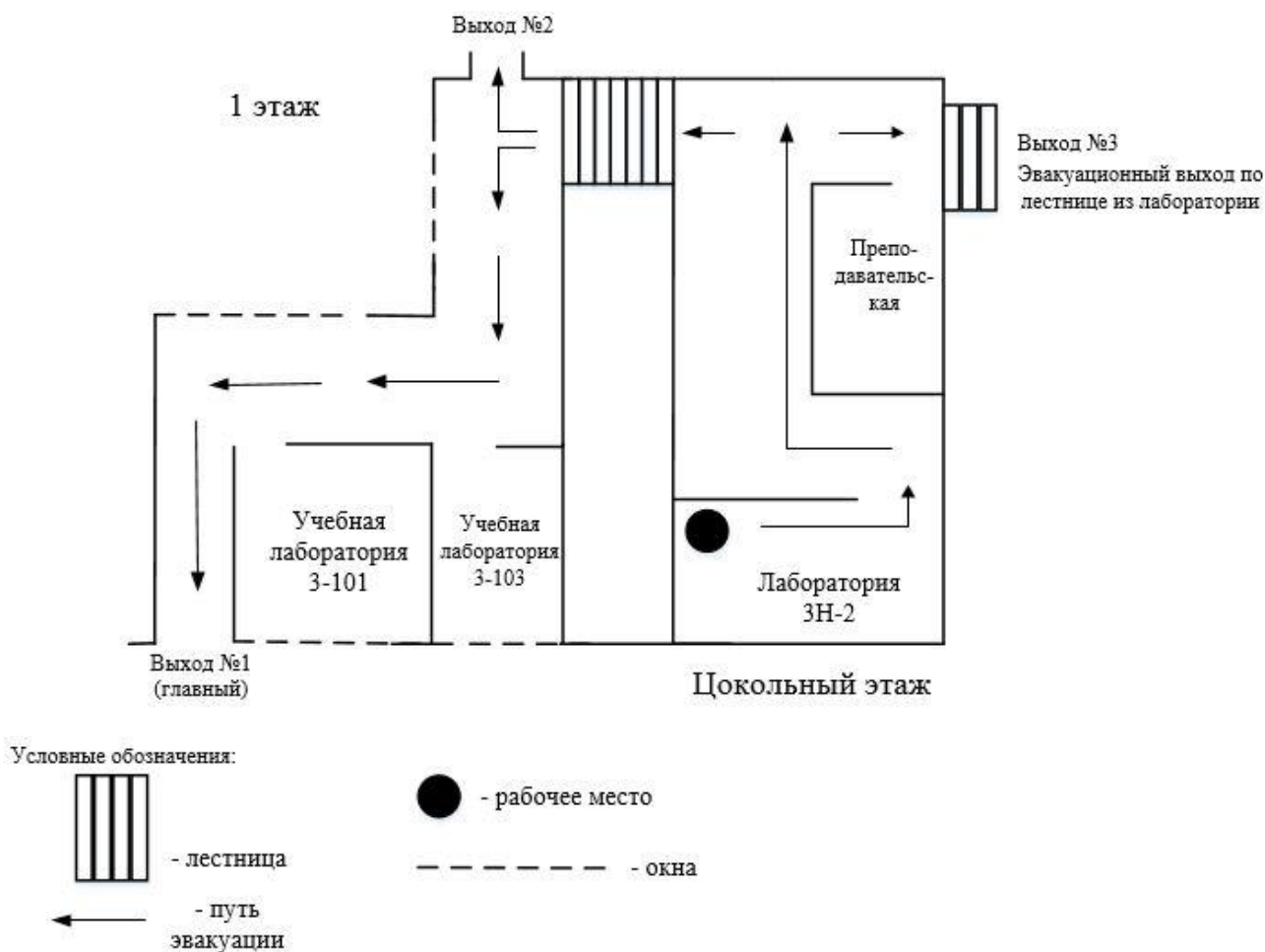


Рисунок 19 – План эвакуации из лаборатории

### 5.2.1.1 Промышленная санитария

ПДК вредных веществ – это допустимое значение загрязняющего химического соединения, содержащегося в почве, воде или воздухе, не влияющее прямо или косвенно на живые организмы. Величины в соответствующих единицах измерения определяют путем токсикологических исследований.

ПДК вредных веществ, в зависимости от степени воздействия на живые организмы, делят на 4 группы опасности:

- I класс – чрезвычайно опасно (ПДК < 0,1);
- II класс – очень опасно (ПДК 0,1 – 1,0);
- III класс – опасно (ПДК 1,0 – 10);
- IV класс – умеренно опасно (ПДК > 10).

В лаборатории присутствуют различные химические соединения, которые представляют опасность для человека, такие как азотная кислота, азот (II) оксид, аммиак, бутан, этанол и так далее.

В таблице 23 представлены химические соединения, их предельно допустимые концентрации (ПДК) и класс опасности.

Таблица 23 – Химические соединения

Химическое соединение	ПДК	Класс опасности
Азотная кислота	2	3
Азот (II) оксид	5	3
Аммиак	20	4
Бутан	300	4
Метанол	5	3
Хлор	1	2
Этанол	1000	4
Этилен	100	4

## 5.2.2 Факторы электрической природы

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасные помещения).

Лаборатория относится к помещению с особой опасностью поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

К СКЗ относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов – в результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности.

К СИЗ относятся инструменты с электроизолированными ручками, резиновые перчатки, резиновые сапоги и деревянные лестницы.

Основными электрозащитными средствами в электроустановках напряжением выше 1000 В являются изолирующие штанги, указатели напряжения, а также изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ.

К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, резиновые коврики и дорожки изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.



### **5.3 Охрана окружающей среды**

Охрана окружающей среды — это система мер, направленных на обеспечение благоприятных и безопасных условий среды обитания и жизнедеятельности человека. Важнейшие факторы окружающей среды — атмосферный воздух, воздух жилищ, вода, почва. Охрана окружающей среды предусматривает сохранение и восстановление природных ресурсов с целью предупреждения прямого и косвенного отрицательного воздействия результатов деятельности человека на природу и здоровье людей.

Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор жидкого азота в специальные емкости (в настоящее время он выпускается в воздух).

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, пластика, резины и так далее. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

### **5.4 Защита в чрезвычайных ситуациях**

Лаборатория находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Такие природные явления, как землетрясения, наводнения, засухи, а также ураганы в данном городе отсутствуют. Возможными чрезвычайными ситуациями на объекте, в данном случае могут быть сильные морозы, которые характерны для Сибири. Достижение критически низких температур может привести к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы или обморожениям. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. Чрезвычайные ситуации,

возникающие в результате диверсий, возникают очень часто. Зачастую такие угрозы оказываются ложными, но случаются взрывы и в действительности.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, их местах установки и количестве.

## **5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

1. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности

2. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”

3. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны

4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".

5. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

6. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

7. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

8. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.

9. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
10. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.  
ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
12. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха
13. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
14. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
15. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение"

## **Заключение**

В заключении можно сделать вывод о том, что метод электрон-позитронной аннигиляции представляет собой наиболее эффективный метод для исследований электронной и дефектной структуры материалов. Характеристики аннигиляции позитронов зависят от структурного состояния материала, на этом и основывается исследование свойств материалов с помощью аннигиляции позитронов. Важной характеристикой исследования является электронная плотность в местах аннигиляции позитронов, а также концентрация и тип дефекта. Изменения характеристик аннигиляции указывают об образовании различных дефектов в материалах.

В данной работе спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время-цифрового преобразователя применяется для исследований электронной и дефектной структуры материала. Данный спектрометр отличен от других существующих аналогов тем, что имеет достаточно простую схему это связано с более простой настройкой спектрометра и низкой стоимостью. Данный спектрометр временного распределения позитронов способен найти широкое применение во многих научных лабораториях и исследовательских центрах, занимающихся исследованием структуры различных материалов.

В ходе данной работы были набраны 3 серии экспериментальных спектров для различных материалов. Согласно полученным результатам, которые отображены в 3 главе можно свидетельствовать о том, что экспериментальные результаты практически совпадают с теоретическими значениями времени жизни позитронов в материалах с небольшой погрешностью. Вследствие этого можно сделать вывод, что спектрометр работает корректно, а также все образцы, которые были исследованы, являются бездефектными, так как время жизни позитронов в дефектных образцах значительно увеличивается.

## Список использованных источников

1. Ли К. Спектрометр доплеровского уширения аннигиляционной линии / К. Ли, Ю. С. Бордулев, Р. С. Лаптев; науч. рук. Ю. С. Бордулев // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С.153-155].
2. Зин Мин У. Исследование изменений электронной структуры и параметров дефектов в сплавах на основе Ni-Cr методом аннигиляции позитронов: диссертация, канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 Москва, 2007 164 с. РГБ ОД, 61:07-1/1031.
3. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов. Составитель: Асабина Е.А. Электронное учебно-методическое пособие. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. — 65 с.
4. Позитрон // Материал из Википедии — свободной энциклопедии. [Электронный ресурс]. - 2014. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Позитрон>
5. Б.С. Ишханов, Э.И. Кэбин. Антиматерия. М., 2012. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/antimatter/>
6. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Позитроника и нанотехнологии: возможности изучения нанообъектов в технически важных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии // Нанотехника. 2008. №4 (16). С. 33–42.
7. Методы исследования систем металл-водород: учебное пособие / Ю. П. Черданцев, И. П. Чернов, Ю. И. Тюрин. — Томск: Изд-во. ТПУ, 2008. — 286 с.
8. Графутин В.И., Грушевский А.В., Залужный А.Г., Калугин И.В., Светлов-Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Определение размеров нанообъектов в некоторых дефектных и пористых системах методом

позитронной аннигиляции // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2009. №2. С. 1–7.

9. В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев. Определение методом позитронной аннигиляционной спектроскопии электронных свойств переходных металлов и сплавов на их основе // Современные материалы и технологии. – 2012. – № 4.

10. Получение позитронов с использованием пучка электронов // Бреховских, Горев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки .— 2014 .— №3 .— С. 134-144.

11. Эммитанс // Материал из Википедии — свободной энциклопедии. [Электронный ресурс]. - 2016. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эммитанс>

12. Разработка метода аннигиляции позитронов для контроля дефектной структуры в системах металл-водород: диссертация кандидата технических наук: 05.11.13 / Лаптев Роман Сергеевич; [Место защиты: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т].

13. Бордулев Ю. С. , Лаптев Р. С. , Гаранин Г. В. , Лидер А. М. Оптимизация параметров спектрометра для исследования времени жизни позитронов в материалах // Современные наукоемкие технологии. - 2013 - №. 8-2. - С. 184-189.

14. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Определение радиусов нанобъектов в пористых системах и некоторых дефектных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии // Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и нейтронные изучения, 2009, №12, 24-32.

15. Zhou Y. G., Zeng W. D., Yu H. Q. An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components // Materials Science and Engineering: A. 2005. Volume 393, Issues 1-2. P. 204 - 212;

16. Климов, Аполлон Николаевич. Ядерная физика и ядерные реакторы: учебник / А. Н. Климов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 352 с.

17. Гольданский В. И. Физическая химия позитрона и позитрония. М.: Наука, 1968.
18. Широков, Юрий Михайлович. Ядерная физика: учебное пособие / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. — 2-е изд., перераб. — М.: Наука, 1980. — 727 с.
19. J. Čížek, I. Procházka, S. Danišl, W. Anwand, A. Mücklich, R. Gemma. Defect studies of hydrogen loaded Nb: bulk metals and thin films. *Phys. stat. sol. (c)* 4, No. 10, 3485–3488 (2007).
20. Арифов У.А., Арифов П.У. Физика медленных позитронов (Ташкент: ФАН, 1971).
21. Grafutin V. I. et al. Determination of the size of vacancy-type defects in angstrom ranges by positron annihilation spectroscopy // *Russian Microelectronics*. — 2011. — Vol. 40. — №. 6. — P. 428-435.
22. Баюров Л.И. Курс лекций по сельскохозяйственной радиологии: Учебное пособие. — Краснодар: КубГАУ, 2009. — 112 с.
23. Позитроника ионных кристаллов, полупроводников и металлов / Е. П. Прокопьев, С. П. Тимошенко, В. И. Графутин и др.; [Ред. Е. Г. Кузнецова]; М-во общ. и проф. образования Российской Федерации. Моск. гос. ин-т электронной техники (Техн. ун-т). - М.: МИЭТ, 1999. - 176 с.
24. Миттова И.Я., Томина Е.В., Лаврушина С.С. Наноматериалы: синтез нанокристаллических порошков и получение компактных нанокристаллических материалов. Учебное пособие для вузов, Воронеж, 2007, 36 с.
25. А.Г.Залужный, А.З.Варисов, В.И.Графутин, О.В.Илюхина, Г.Г.Мясищева, Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенко, Ю.В.Фунтиков. Термализация позитронов и атома позитрония в полупроводниках и ионных кристаллах. Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и нейтронные изучения. 2008. №2. С.15-20.
26. Hodges C. H. Positron diffusion and trapping at vacancies // *Journal of Physics F: Metal Physics*. — 1974. — Vol. 4. — №. 11. — P. L230.

27. Графутин В.И., Прокопьев Е.П. Применение и развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для определения природы, концентраций и размеров нанобъектов в пористых системах, дефектных материалах и наноматериалах. ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова. 117 с.
28. Прокопьев Е.П., Графутин В.И., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Возможности исследования пористых систем и наноматериалов методом позитронной аннигиляционной спектроскопии //Дефектоскопия. 2008. № 10. С. 55–70.
29. Dupasquier A., Mills A.P. Positron Spectroscopy of Solids //Proceedings International School of Physics «Enrico Fermi», Course CXXV. – 1993.
30. Хмелевский Николай Олегович. Аннигиляция позитронов в сплавах железа: диссертация кандидата Физико-математических наук: 01.04.07 / Хмелевский Николай Олегович; [Место защиты: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана].- Москва, 2016.- 143 с.
31. Кэбин Э. Ядерная электроника для пользователей // Ядерная физика в Интернете. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ. 2007. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/electronics/>
32. Евгений Владимиров, Владимир Ланцов, Ольга Лебедева (Санкт-Петербург). Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора (часть 1) // Современная электроника №1, 2008. 6 с.
33. Шендрик, Роман Юрьевич. Введение в физику сцинтилляторов: учебное пособие / Р. Ю. Шендрик; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Иркутский гос. ун-т", Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Ин-т геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения Российской акад. наук. - Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013.



34. Фотоэлектронный умножитель // Материал из Википедии — свободной энциклопедии. [Электронный ресурс]. - 2014. - Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотоэлектронный\\_умножитель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотоэлектронный_умножитель)
35. Бритков О. М. и др. Применение метода позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования дефектов структуры твердого тела // Вопросы атомной науки и техники. Сер. теор. и прикл. физика. – 2004. – №. 3. – С. 40-50.
36. Becvar F. et al. The asset of ultra-fast digitizers for positron-lifetime spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2005. – Vol. 539. – №. 1. – P. 372-385.
37. Time-to-digital converter – FAST ComTec // URL: <https://www.fastcomtec.com/ftp/manuals/7072tdoc.pdf> (дата обращения дата обращения: 16.09.2014).
38. Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований: Учеб. пособие. М., 1983.
39. Giebel D., Kansy J. A new version of LT program for positron lifetime spectra analysis // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 666. – P. 138-141.
40. Giebel D., Kansy J. LT10 program for solving basic problems connected with defect detection // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 35. – P. 122-127.
41. Olsen J. V. et al. PALSfit: A new program for the evaluation of positron lifetime spectra // Physica status solidi (c). – 2007. – Vol. 4. – №. 10. – P. 4004-4006.
42. Robles J. M. C., Ogando E., Plazaola F. Positron lifetime calculation for the elements of the periodic table // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2007. – Vol. 19. – №. 17. – P. 176-222.
43. H. Surbeck, *Helv. Phys. Acta* 50, 705 (1977).
44. N. Djourellov, M. Misheva *J. Phys.: Condens. Matter* 8, 2081 (1996).

## Приложение А

### Раздел 2

#### Экспериментальная установка для измерения времени жизни позитронов

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б31	Быстров А.С.		

Консультант кафедры ОФ ФТИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой	Лидер А.М.	к. ф.-м. н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ ФТИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кабрышева О.П.			

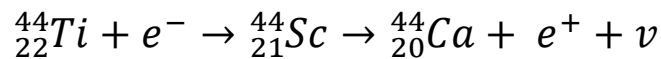
## Chapter 2. Experimental setup for measuring the lifetime of positrons

### 2.1 Analog spectrometer of the lifetime of positrons

The delayed-coincidence method is applied for measurement of a lifetime of positrons in material. The idea of a method is based on the measurement of speed account of delayed coincidences between annihilation  $\gamma$ -quantum with energy is equal to 0,511 MeV, and the nuclear  $\gamma$ -quantum emitted almost simultaneously with the positron. The lifetime of the positron in material depends on density of electrons prevailing about positron.

The radioactive source of positrons  $^{44}\text{Ti}$  applied in this experiment. The maximum energy of the positrons in the source is 1,467 MeV.

Reaction of the decay of  $^{44}\text{Ti}$  can be written as follows:



The energy spectrum of the decay of  $^{44}\text{Ti}$  is shown in figure 5:

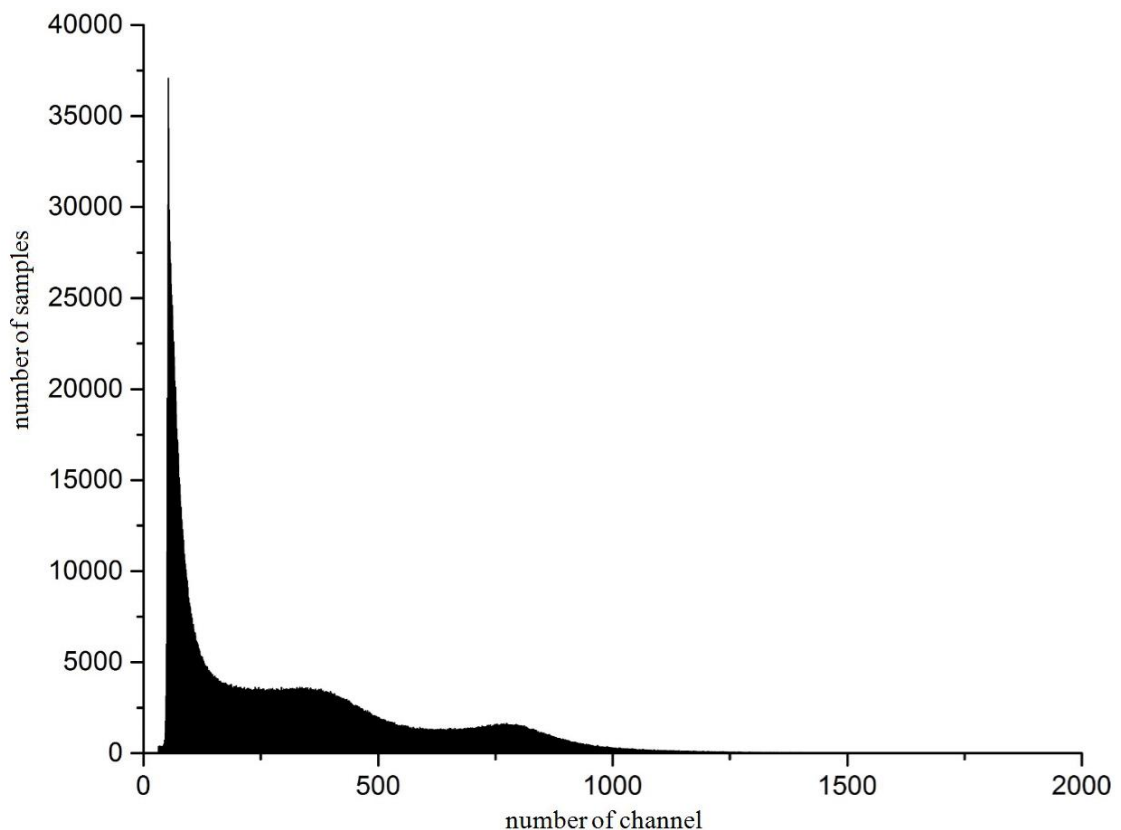


Figure 5 – The energy spectrum of the decay of  $^{44}\text{Ti}$

## 2.2 The principle of operation of the analog spectrometer for measuring the lifetime of positrons

The installation consists of traditional fast circuit, which includes a high voltage power supply (FAST ComTec NHQ 203M), two scintillation detectors (Hamamatsu H3378-50), two fast differential discriminators (FAST ComTec model 7029A), a nanosecond delay unit (Canberra model 2058), the time – to-digital converter (FAST ComTec dual TADC 7072T), multiparameter multichannel analyzer (FAST ComTec MPA4) and a personal computer. Spectrometer lifetime of positrons is shown in figure 6.

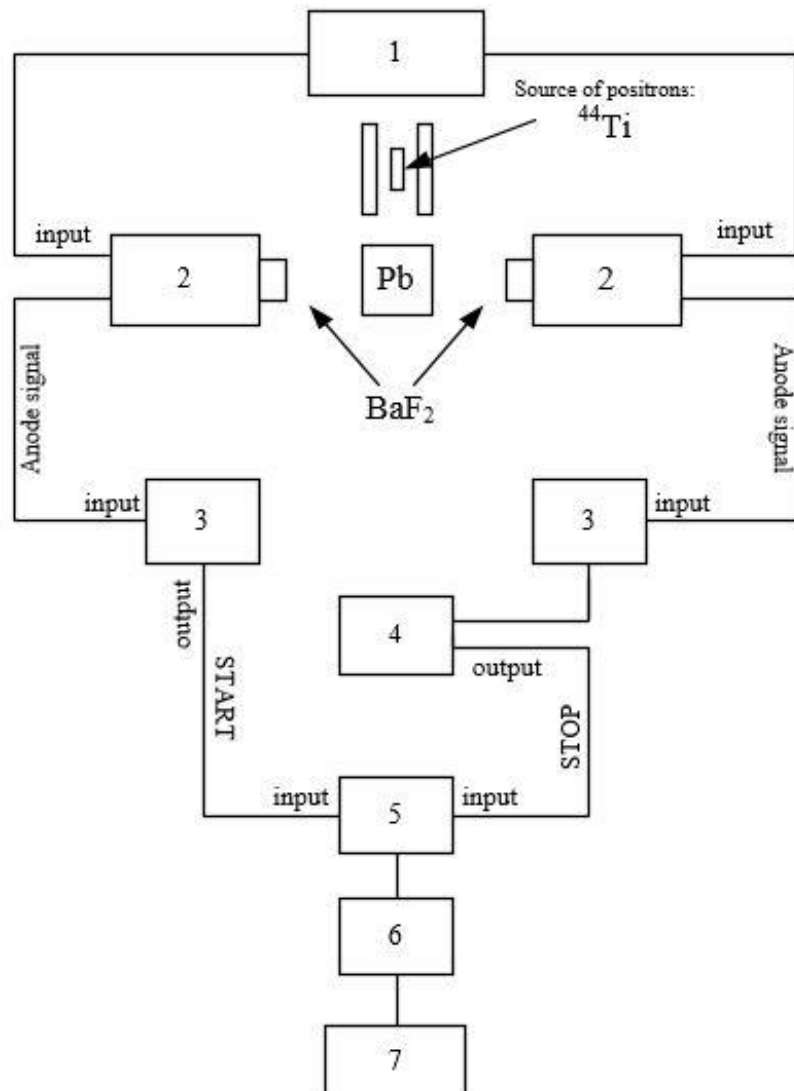


Figure 6 – Spectrometer lifetime of positrons, where 1 – high voltage power supply, 2 – photomultiplier tube, 3 – discriminator constant component, 4 –

nanosecond unit of delays, 5 – time-to-digital converter, 6 – multiparameter analyzer, 7 – personal computer.

As a positron source the radioactive isotope  $^{44}\text{Ti}$  ( $\beta^+$ ,  $\gamma$ ) with the activity of 24,5; 34,4; 67,5 mCi and maximum positron energy of 1,467 MeV was used. The source was made by CJSC «Cyclotron», Obninsk, Russian Federation. This isotope can be used for positron lifetime measurements because in the process of its  $\beta$ -decay, almost simultaneously with the birth of the positron, the  $\gamma$ -quantum with the energy of 1,157 MeV is emitted.

The advantages of the  $^{44}\text{Ti}$  positron source in comparison with the traditional  $^{22}\text{Na}$  are:

- High yield of positrons (about 97%);
- Longer working lifespan of the source, due to the greater half-life (47,4 years);
- Higher energy of positrons allows investigation the substance at the depth 3 times deeper than the penetration depth of positrons from  $^{22}\text{Na}$ ;
- Increased mechanical strength of the source due to the presence of protective titanium capsule.

The disadvantage of protective capsule is relatively high contribution of the positron annihilation process in the material capsules made of titanium VT1-0.

Positron source is located between two samples of material, forming the so-called «sandwich geometry». The main advantage of this geometry is that the positrons emitted from the source, directly penetrate into the sample, what allows measurements in air. Events corresponding to the appearance of a nuclear  $\gamma$ -quantum recorded by scintillation detector are called start-signals. Once the positron penetrates into the matter, it loses its kinetic energy in the elastic and inelastic scattering and then annihilates with the electron environment, forming two annihilation  $\gamma$  - rays of energy 0,511 MeV, one of which is recorded by another detector and become the stop-signal. Registration of  $\gamma$ -quanta is realized by two scintillation detectors based on scintillators  $\text{BaF}_2$  and the photomultiplier tubes (PMT).

Detectors are powered by two-channel high-voltage power supply. The pulses from the detectors are fed to the discriminator, where the amplitude selection and timing of the front of the signal is carried out. The signal from the anode of the detector registering the start-signals is fed to the Differential Constant Fraction Discriminator, where the lower threshold is tuned in such a way when only the area of 1,157 MeV annihilation peak is captured. The anode signals from the detector of stop-signals are transmitted to the differential CFD with two (lower and upper) thresholds. Thresholds are adjusted to make a selection of pulses corresponding to the annihilation  $\gamma$ -quanta with energy of 0,511 MeV.

The start-pulses from the integral discriminator are fed directly to the start input of time-to-digital converter (TDC). The stop-pulses from the differential discriminator through the nano-second delay module are fed to the stop input of time-to-digital converter (TDC). Thus the measurement time between the nuclear (1,157 MeV) and annihilation (0,511 MeV)  $\gamma$ -rays is the lifetime of the positron in certain material.

### 2.2.1 Description design of the spectrometer

The following paragraphs provide a description of the spectrometer units and schemes of individual nodes. The spectrometer consists of the following elements:



Figure 7 – Multiparameter multichannel analyzer



Figure 8 – A – high voltage power source B – a differential discriminator, C – block nanosecond of delay, D – time-to-digital converter.

### 2.2.1.1 High voltage power supply

The Models NHQ 203M supplies are a two channel high voltage version in a NIM chassis. Modern patented circuit principles in connection with the latest SMT manufacturing technologies permit the design and construction of very compact high voltage supplies with excellent specifications.

All NHQ models are 1 slot wide, and offer either manual control or operation via RS232 Interface. The use of this interface supports more than the manual control functionality.

The high voltage supplies provide high precision output voltages together with very low ripple and noise, even under full load. Separate 10%-step hardware

switches enable to set voltage and current limits. An INHIBIT input provides instant shutdown to protect sensitive detector devices.

Additionally, the maximal output current per channel is programmable via the interface. The high voltage outputs protected against overload and short circuit. The output polarity can be selected by manual rotary switches accessible from the side of the module without having to take the side-cover off.

The output voltage can also be set by software through the RS232C interface. The chosen polarity is displayed by a LED on the front panel and a sign on the LCD display. It is not allowed to change the polarity under power! An undefined switch setting (not at one of the end positions) will cause no output voltage.

For effective protection of connected devices the maximum output voltage and current can be selected in 10%-steps with the rotary switches  $V_{\max}$  and  $I_{\max}$  (switch dialed to 10 corresponds to 100%). An output voltage or current exceeding the set limit is signalled by the red front panel error LED.

#### 2.2.1.2 Block of scintillation detectors

Detectors are the main node in the device for determining the time resolution of the spectrometer. The spectrometer uses two identical design of the block detectors, which consist of a scintillator and a photoelectron multiplier (PMT).

A scintillator is the substance that has the ability to emit a flash of light in the case when there is absorption of ionizing radiation ( $\gamma$ -rays). The scintillation detector is made of scintillator where the ionizing particles emit a flash of light, and a photomultiplier which converts the light flash into an electrical current pulse.

This scheme uses two scintillation detectors Hamamatsu H3378-50 on the basis of the crystal  $\text{BaF}_2$ . The crystals of barium fluoride have a special place in the physics of nuclear radiation. Such scintillators are used in the devices having a high counting speed of events. Such scintillators are particularly important in the devices with high count rate events, as well as to improve the operation of the detection unit of the spectrometer. Nowadays, the  $\text{BaF}_2$  crystal in many respects superior to the



resolution of scintillator-based plastic, this crystal has good characteristics: high speed flashing and good energy resolution. The energy spectrum of the scintillation detectors is shown in figure 9.

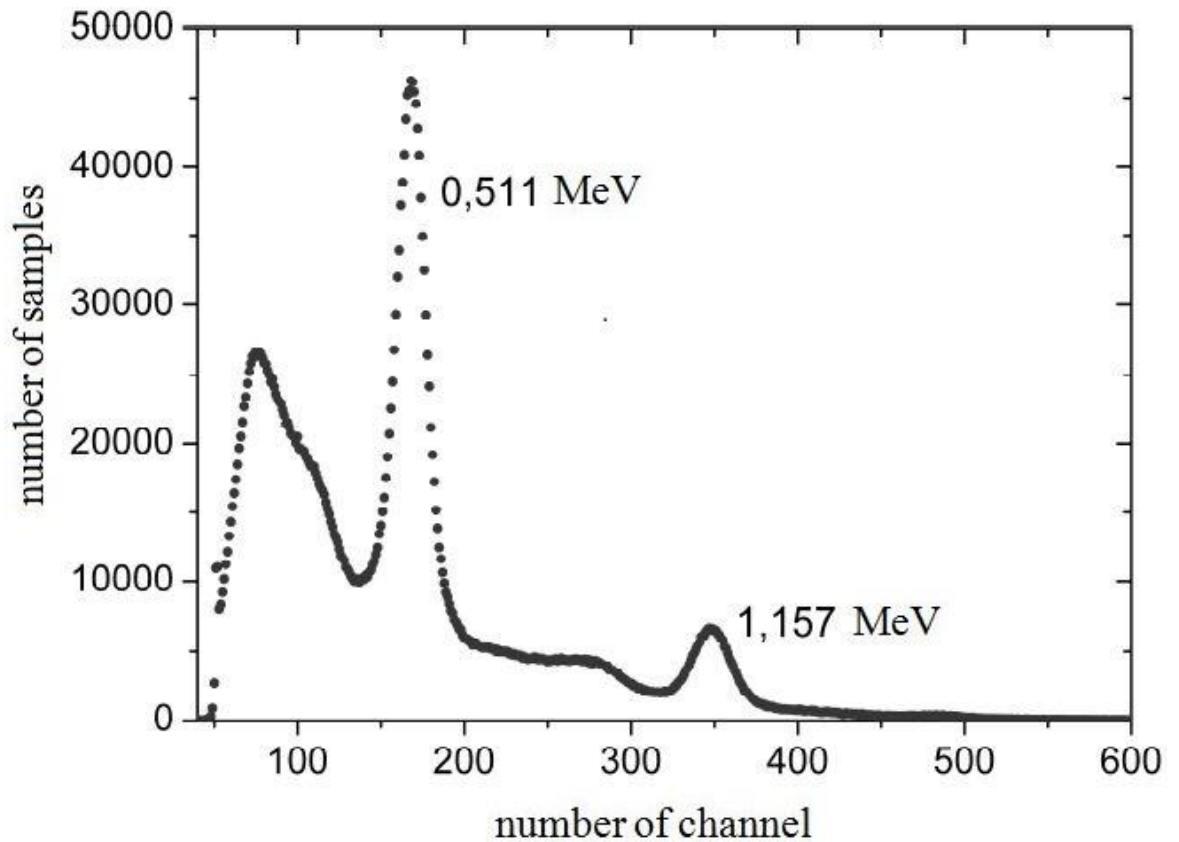


Figure 9 – Energy spectrum on the basis of the scintillator BaF<sub>2</sub>

Photomultiplier tube (PMT) is a vacuum device, where the flow of electrons, which are emitted by the photocathode under the action of optical radiation, as a consequence, the gain of particles in multiplier system due to secondary electron emission. The initial photocurrent is significantly less than the current in the anode circuit. The photo-electronic multiplier with an attached scintillator BaF<sub>2</sub> is shown in figure 10.

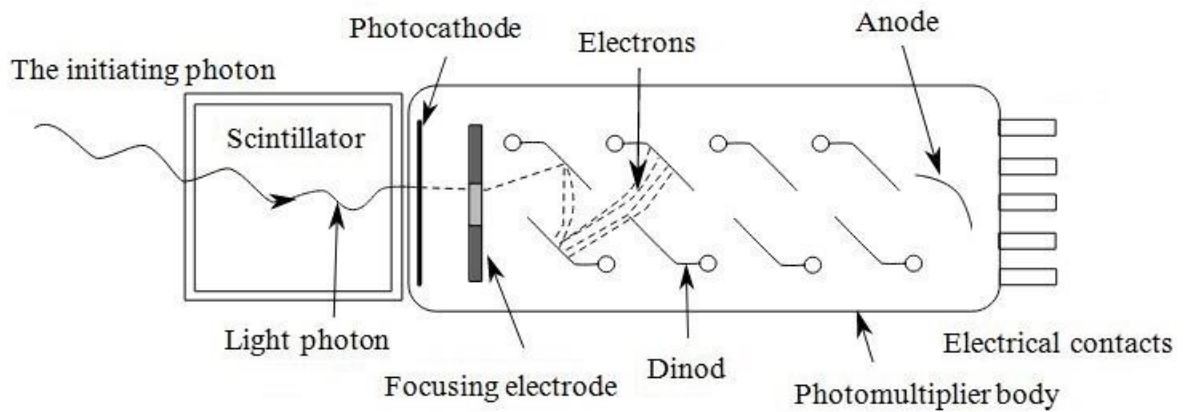


Figure 10 – Photo-electronic multiplier with an attached scintillator BaF<sub>2</sub>

The structure of the photoelectric multiplier represents the inlet chamber, multiplying dynode system, an anode and additional electrodes. The device is made in the form of balloon in a vacuum housing in which a glass or quartz window through which light falls on the photosensitive element is the photocathode. The photocathode, in turn, emits electrons, and they are multiplied in special electrodes, called dinode. At the end of the dynode chain is the anode or the collective electrode. The current that flows through the anode is proportional to the photocurrent generated by the photocathode.

The thickness of the photocathode is an important parameter. The thicker the photocathode, the more photons are absorbed with a smaller quantity of emitted electrons. The less photocathode layer, the more photons pass through it without absorption. The electrons running through the photocathode are accelerated by the dynode chain. Very often, the focusing electrodes are used, which direct all the photoelectrons coming from the photocathode to the first dinod. When the photoelectron hits in the first dinod, it causes secondary electron emission, increasing its magnification, they are accelerated by the dynode chain from one to the next. Multiplication depends on the voltage between dinode and the total number of dynodes.

Table 3 shows the main characteristics of the Hamamatsu H3378-50 photoelectric multiplier.

Table 3 – Main characteristics of the photomultiplier

Factory model number	H3378-50
Type	Fast PMT
Size	51 mm
Effective area	46
Type of cathode	Two-alkaline
Peak wavelength	420 nm
Peak radiative sensitivity	80 mA / V
Input window material	Quartz glass
Minimum wavelength	160 nm
Maximum wavelength	650 nm
Sensitivity of the photocathode to the light flux	80 ICA / lm
Anode sensitivity to light flux	200 A/ lm
Amplification factor	$2,5 \cdot 10^6$
Dark current	100 mV
The structure of dinodon / Number of levels	Linear / 8

### 2.2.1.3 Differential discriminator

This scheme uses two differential discriminators (FAST ComTec model 7029A). The discriminator output signal pulse whose amplitude lies within specified limits. In this device there are two discrimination thresholds – an upper and a lower. The window width is the difference between the two thresholds. An important characteristic of the discriminator is the input sensitivity, i.e. the nominal voltage of the input signal. To improve the temporal resolution of the spectrometer, the need to minimize the number of false positives differential discriminators pulses from the energy of which is not consistent with the values of the annihilation and nuclear  $\gamma$  – quantum. The energy spectrum with thresholds of discrimination shows in fig. 9.

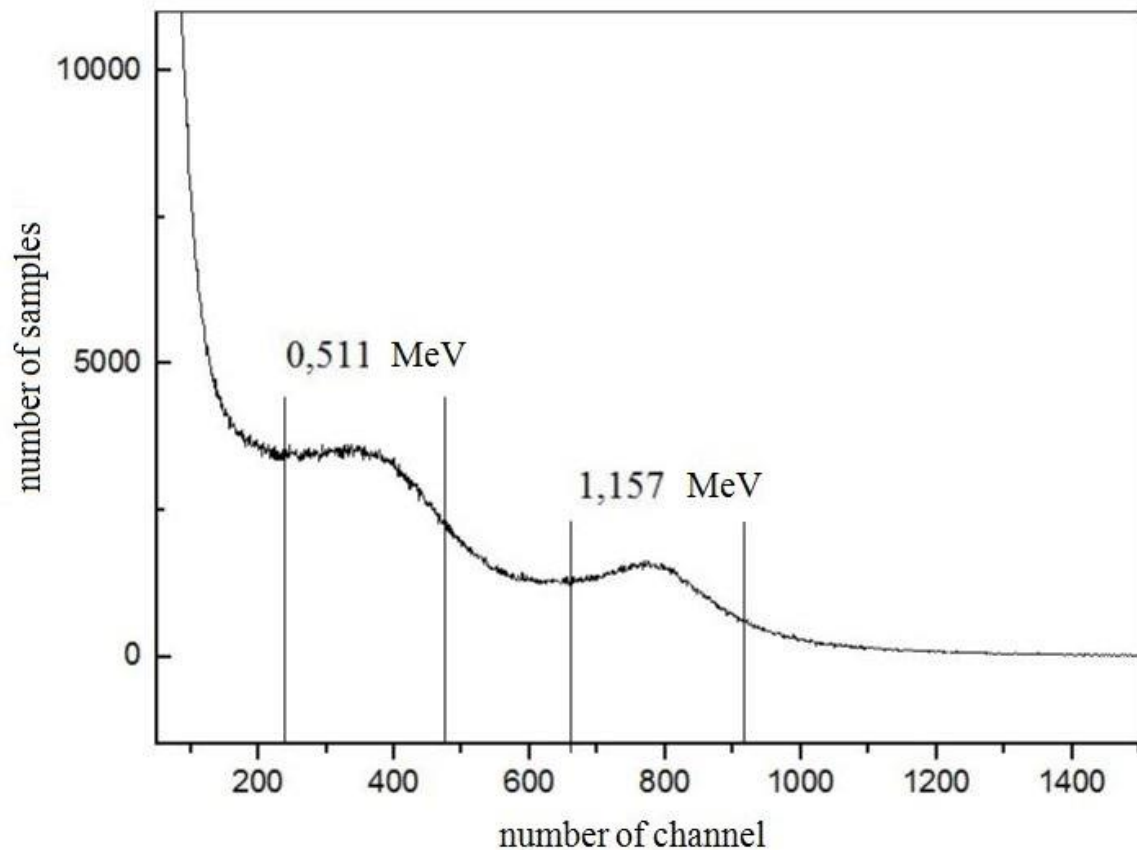


Figure 11 – Energy spectrum with the configured thresholds of discrimination

The model 7029A is a fully dc coupled discriminator which can be simultaneously used as a normal Constant Fraction Discriminator (BLD part) and as a Differential Constant Fraction Discriminator (SCA part) with upper and lower level settings that allow precise selection of energy ranges from which the timing signal is to be derived. The unit provides optimum time resolution for many detector types and applications either using the slow risetime reject mode (SR) or the constant fraction mode of operation.

#### 2.2.1.4 The unit nanosecond of delay

The Model 2058 Nanosecond Delay permits the delay of linear or logic signals up to 63,5 ns in 0,5 ns steps. Since the delays are accomplished by means of interconnected coaxial cables, no power is required for operation of the module. Seven front panel toggle switches allow the selection of 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 or 32 ns of

delay time. These delays may be added in any combination. Delay times greater than 63,5 ns may be obtained by cascading several Nanosecond Delay units. The Model 2058 is useful in aligning fast timing channels which operate coincidence circuits or time to amplitude converters. The high degree of accuracy in delay time selection is an aid to the calibration of such equipment. Table 4 presents the main characteristics of nanosecond unit of delays.

Table 4. Main characteristics

Working range	0,5 – 63,5 ns
Operating temperature range	0 – 50 °C
Operating humidity	from 0 to 80%
Accuracy of delay	± 20 ps
Size	3,43 x 22,12 cm
Mass	0,8 kg

#### 2.2.1.5 Time-to-digital converter

The Model 7072T is a unique dual channel device that can operate either as an ultra fast pulse height analyzing analog-to-digital converter (PHA ADC) with a fixed conversion time of 500 ns, a time-to-digital converter (TDC) or a sampling voltage analyzer (SVA ADC). The 7072T is ideally suited for high counting rate applications in Energy and Time Spectroscopy. The combined ADC / TDC function finds applications in time resolved photon-, ion-, neutron- and X-ray imaging. The built-in Single Channel Analyzer (SCA) has a separate output on the front panel. This output can be used in the ADC modes in such applications as Moessbauer Spectroscopy. The same connector is used as analog output for monitoring the TAC (Time-to-Amplitude Converter) in TDC mode and four different threshold levels when they are set in the ADJUST mode. In the SVA mode a voltage level or waveform can be sampled when a GATE signal is applied.

### 2.2.1.6 Multiparameter (multichannel) analyzer

The MPA4 Multiparameter System is an ultra fast listmode multichannel data acquisition system featuring performance and measurement capabilities previously not known in commercially available multiparameter systems. Multichannel analyzers don't provide the ability to produce a sweep speed which is more than  $10^7$  channel/sec.

Multiparameter data acquisition system MPA4 is used in this work. The system is designed as a superfast system with input ports (8-port). In the device 16-bit ports can be combined into a 32-bit-or even 64-bit ports.

This analyzer is used for:

- a) data collection mode ultra-fast single-parameter mode
- b) ultra fast detection and display of multiple spectra

## **Conclusion**

Methods of electron-positron annihilation (EPA) have proven to be effective laboratory techniques for precision studies of electron and defect structure of materials in solid state physics and material science.

Currently, positron annihilation lifetime spectrometry (PALS) is one of the most sensitive ( $10^{-7}$  vacancies / atom) tools for defects inspection. Positron lifetime spectrometers are used to determine the size of nanoobjects (vacancies, vacancy clusters), open volume defects, voids, and their concentrations in porous systems, defective materials, nanomaterials and semiconductors.

Thus, in this chapter we consider an experimental setup for measuring the lifetime of positrons in various materials, as well as the principle of operation of the spectrometer. This spectrometer is used for determining the size of nanoobjects (vacancies), cavity free volumes of pores, their concentration in most of the defective semiconductors and nanomaterials.