

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы

Моделирование регистрации высокоэнергетических гамма-квантов в СПО Geant4

УДК 621.384.664:539.128

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Б	Чумаков Даниил Камбарбекович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Варлачев Валерий Александрович	Д.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник лаб. №33 ЯР	Дудкин Геннадий Николаевич	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	К.Т.Н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Общекультурные компетенции	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Профессиональные компетенции	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:	
Введение	
Обзор литературы	
Экспериментальная установка ИДМ-40 и сопряженное оборудование	
Расчетная часть	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.02.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Варлачев Валерий Александрович	д.т.н.		15.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Б	Чумаков Даниил Камбарбекович		15.02.2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерного топливного цикла
 Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.02.2020	Составление и утверждение технического задания	5
20.02.2020	Подбор и изучение материалов по теме	10
25.02.2020	Выбор направления исследования	5
08.03.2020	Проведение экспериментальных и расчетных работ	45
07.05.2020	Анализ и описание результатов	30
20.05.2020	Подготовка к защите ВКР	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ	Варлачев Валерий Александрович	д.т.н.		15.02.2020

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник лаб. №33 ЯР	Дудкин Геннадий Николаевич	к.ф.-м.н.		15.02.2020

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6Б	Чумакову Даниилу Камбарбековичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерная физика и технологии / Физика атомного ядра и частиц

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на электроэнергию 2.45 руб. за 1 кВт*ч
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды - 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения НИ</i>	Структура работ, определение трудоемкости, разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета НИ</i>	Расчет бюджета затрат на выполнение НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности НИ</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.02.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н		15.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Б	Чумаков Даниил Камбарбекович		15.02.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6Б	Чумакову Даниилу Камбарбековичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Тема ВКР:

Моделирование регистрации высокоэнергетических гамма-квантов в СПО Geant4	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	- модель регистрации γ -квантов системой NaI(Tl) детекторов, образующихся при исследовании реакций синтеза легких ядер; экспериментальная ядерная физика
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- Федеральный закон от 09 янв. 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» - СанПиН 2.2.2/2.4.2732–10 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: - отклонение показателей микроклимата; - повышенный уровень шума; - недостаточная освещенность рабочей зоны; - повышенный уровень электромагнитных излучений; - психофизиологические факторы; - повышенный уровень ионизирующих излучений; - опасность поражения электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	- анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; - разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	- выбор и описание типичной ЧС - пожар; - обоснование мероприятий по предотвращению ЧС; - порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	05.05.2020
--	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		05.05.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Б	Чумаков Даниил Камбарбекович		05.05.2020

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 100 страниц, 15 рисунков, 22 таблицы, 30 источников, 6 приложений.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, сцинтилляционный детектор, моделирование, метод Монте-Карло, эффективность регистрации, Geant4, аппаратурный спектр, ИДМ-40.

Объектом исследования является (-ются): восемь детекторов NaI(Tl), находящиеся в оптическом контакте с ФЭУ Hamamatsu R1307, эффективность регистрации гамма-квантов детекторами.

Цель работы - определение эффективности регистрации γ -квантов с энергиями до 20 МэВ, получаемых на установке ИДМ-40, при различных вариантах расположения детекторов.

В процессе исследования проводились: снятие спектра γ -квантов от AmBe источника, создание программного кода для симуляции аппаратурных спектров, сравнение полученных в симуляции спектров с экспериментальными, оценка влияния анизотропии распределения γ -квантов на эффективность регистрации, анализ финансовой целесообразности исполнения работы, определено соответствие нормам в социальной, правовой и экологической сферах.

В результате исследования создан программный код, позволяющий с помощью метода Монте-Карло моделировать аппаратурные спектры γ -квантов с учетом характеристик реальных детекторов, получены кривые эффективности регистрации γ -квантов детекторами при различных вариантах их расположения.

Область применения: ядерная физика, спектрометрия ионизирующих излучений.

В будущем планируется дополнение программного кода для учета влияния на вид спектра продуктов взаимодействия нейтронов с материалами установки и влияния наложения амплитуд при спектрометрии с использованием сцинтилляционных детекторов.

Перечень определений

ERD-метод: способ определения концентрации напыления по глубине с помощью упруго рассеянных атомов отдачи под действием потока альфа-частиц, падающих на мишень.

AmBe источник: источник нейтронного и γ -излучения, возникающего под действием реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}^* + n$; ${}^{12}_6\text{C}^* \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$, $E_\gamma = 4.43$ МэВ.

Световыход сцинтиллятора: среднее число сцинтилляционных фотонов, образующихся в кристалле сцинтиллятора при поглощении 1 МэВ энергии; Определяется средней энергией образования сцинтилляционного фотона.

S-фактор: форма записи сечений реакций с учетом кулоновского взаимодействия и энергии частиц в системе центра масс.

Сумматор: устройство для обработки сигналов от нескольких источников (в данном случае – с сигнальных выходов нескольких ФЭУ), в котором сигналы, поданные на несколько входов, передаются далее на единственный выход.

Обозначения и сокращения

СЦИ, СЦМ – система центра инерции, система центра масс;

ЛСК – лабораторная система координат;

ПШПВ – полная ширина пика на половине его высоты;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;

ИДМ-40 – ионный диод с магнитной изоляцией, напряжение в ускоряющем межэлектродном промежутке до 40 кВ;

кэВ – килоэлектронвольт, $1.6 \cdot 10^{-16}$ Дж;

МэВ – мегаэлектронвольт, $1.6 \cdot 10^{-13}$ Дж;

ХРИ – характеристическое рентгеновское излучение;

ППД – полупроводниковый детектор.

Оглавление

Введение.....	16
1 Обзор литературы	19
1.1 Обзор существующих подходов к моделированию детекторов	19
1.2 Исследуемые реакции.....	21
2 Экспериментальная установка ИДМ-40 и сопряженное оборудование ..	23
2.1 Импульсный ускоритель ИДМ-40.....	23
2.2 Тритиевые мишени	27
2.3 Эффективность регистрации γ -квантов детекторами	31
2.4 Конфигурации расположения детекторов.....	34
3 Расчетная часть.....	35
3.1 Метод Монте-Карло в ядерной физике	35
3.2 Характеристики рабочей среды для произведения расчета	36
3.3 Создание геометрической модели установки ИДМ-40.....	37
3.4 Симуляция реального аппаратурного спектра.....	39
3.5 Получение расчетных спектров.....	42
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	46
4.1 Оценка коммерческого потенциала проводимого НИ.....	46
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	46
4.1.2 SWOT-анализ.....	48
4.2 Планирование НИР	49
4.2.1 Структура работ в рамках НИР	49
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	51
4.2.3 Разработка графика проведения исследования.....	51
4.3 Бюджет научного исследования.....	55
4.3.1 Материальные затраты на НИ	55

4.3.2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	56
4.3.3	Расчет амортизации специального оборудования.....	56
4.3.4	Основная заработная плата	58
4.3.5	Дополнительная заработная плата	60
4.3.6	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). ..	60
4.3.7	Накладные расходы	60
4.4	Определение ресурсоэффективности исследования	61
4.4.1	Интегральный показатель финансовой эффективности	61
4.4.2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	63
4.4.3	Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки.....	64
5	Социальная ответственность	66
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	66
5.1.1	Производственная безопасность при работе с ускорителями.....	66
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	68
5.2	Анализ вредных и опасных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня их воздействия на исследователя	69
5.2.1	Изменение показателей микроклимата в рабочем помещении.....	70
5.2.2	Превышение уровня шума в рабочем помещении	70
5.2.3.	Недостаточная освещенность рабочего места	71
5.2.4	Повышенный уровень электромагнитного излучения.....	71
5.2.5	Психофизиологические факторы	73
5.2.6	Повышенный уровень ионизирующих излучений	73
5.2.7	Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.....	75
5.3	Экологическая безопасность.....	76

5.4 Анализ вероятных ЧС, разработка порядка действий и обоснование мер по ликвидации их последствий.....	78
5.4.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования	78
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС	79
Заключение	81
Список использованной литературы	84
Приложение А	88
Приложение Б.....	90
Приложение В	92
Приложение Г	94
Приложение Д	97
Приложение Е.....	99

Введение

В настоящее время особый интерес представляет изучение следующих реакций синтеза в астрофизической области энергий (порядка единиц – десятков кэВ в с.ц.и): $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (5.5 МэВ); $p + t \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ (19.8 МэВ); $t + {}^3\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ (15.8 МэВ), - в первую очередь для фундаментальной физики – получение и уточнение экспериментальных значений сечений этих реакций в данной области энергий [1, 2] или, в частности, изучение последней реакции, исследование которой может пролить свет на проблему «космологического лития». Однако при энергиях порядка десятков кэВ ожидается, что сечения этих реакций не будут превышать сотен нанобарн. В то же время, присутствие побочных реакций с выходом нейтронов: $t + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n + p$; $t + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + n$; $t + t \rightarrow {}^4\text{He} + nn$; $t + t \rightarrow {}^5\text{He} + n$; $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ [2] может значительно осложнить получение достоверных данных о выходе исследуемых реакций из-за появления в спектре продуктов этих реакций линий, возникших при взаимодействии нейтронов с материалами детектора и окружающей аппаратуры. Таким образом, требуется создать такую сборку детекторов, которая максимально эффективно регистрировала бы γ -кванты с приведенными выше энергиями.

И хотя для pd – реакции оценку эффективности регистрации можно произвести с помощью изотопного AmBe источника с энергией $E_\gamma = 4.432$ МэВ, для оценки эффективности регистрации продуктов реакций с энергиями γ -квантов свыше 10 МэВ нет изотопных источников с близкими энергиями. Экспериментальная оценка потребовала бы значительных затрат времени и ресурсов из-за низких сечений приведенных реакций. В таком случае, более эффективным способом является применение метода Монте-Карло и создание кода, симулирующего регистрацию γ -квантов в специализированных инструментариях ядерной физики, в частности, Geant4.

Актуальность проводимых на ИДМ-40 исследований заключается в необходимости изучения реакций синтеза легких ядер в астрофизической

области энергий (единицы - десятки кэВ в СЦИ) для уточнения их сечений –так, для $T(^3\text{He}, \gamma)^6\text{Li}$ и $T(p, \gamma)^4\text{He}$ в данной области энергий достоверно известны лишь теоретические оценки сечений. Изучение поведения этих реакций представляет существенный интерес как для теоретической ядерной физики, так и для астрофизики.

Актуальность данной работы заключается в необходимости создания программного кода, позволяющего моделировать регистрацию частиц детекторами и получать путем расчета аналоги аппаратурных спектров, необходимого для быстрого и точного нахождения эффективности детекторов и определения вклада продуктов побочных реакций в спектр при проведении как ускорительных экспериментов в ядерной физике, так и при работе с источниками ионизирующего излучения.

Целью данной выпускной квалификационной работы бакалавра является определение эффективности регистрации γ -квантов с энергиями до 20 МэВ, получаемых на установке ИДМ-40, при различных вариантах расположения детекторов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Произвести поиск и обзор существующих решений по созданию моделей сцинтилляционных детекторов в Geant4;
2. Создать геометрическую модель вакуумной камеры и системы регистрации установки ИДМ-40;
3. Получить из экспериментального спектра аналитической зависимости ПШПВ(E);
4. Создать программный код, позволяющий быстро и достоверно определять эффективность регистрации γ -квантов системой детекторов;
5. Проверить корректность модели путем сравнения рассчитанных при моделировании спектров с экспериментальными;
6. Получить в отлаженной версии симуляции аппаратурных спектров при различных энергиях γ -квантов от источника;

7. Определить влияние на эффективность регистрации учета анизотропии распределения по углам вылетающих γ -квантов;
8. Получить кривые эффективности из расчетных спектров и определение наиболее эффективной конфигурации расположения детекторов;
9. Проанализировать полученные результатов.

1 Обзор литературы

1.1 Обзор существующих подходов к моделированию детекторов

В настоящее время при моделировании регистрации γ -квантов сцинтилляционными детекторами в инструментарии Geant4 существует два подхода: упрощенный и полный.

При полном моделировании системы регистрации необходимо создать симуляцию последовательности всех физических процессов от взаимодействия γ -квантов с веществом до усиления выбитых с фотокатода электронов диодной системой в фотоэлектронном умножителе. В этом случае моделируется образование в кристалле детектора сцинтилляционных фотонов, их прохождение через кристалл, отражение от стенок или поглощение на пути к фотокатоду; затем отслеживается процесс выбивания сцинтилляционными фотонами электронов из фотокатода и их размножение в диодной системе, после чего снимается информация о количестве электронов и ставится в соответствие энергии, оставленной продуктами взаимодействия γ -кванта в детекторе. Такой подход хорош для моделирования конкретного детектора с определенными характеристиками кристалла и ФЭУ – он позволяет подобрать материалы таким образом, чтобы посредством симуляции создать детектор с наилучшим разрешением за счет наименьших потерь фотонов на пути к фотокатоду. Однако расчет с использованием такого подхода требует значительных затрат ресурсов компьютера для вычисления траекторий и вероятности поглощения каждого сцинтилляционного фотона.

В свою очередь, при упрощенном моделировании нет необходимости в симуляции образования сцинтилляционных фотонов и отслеживании последующих процессов. В этом случае моделируется лишь взаимодействие γ -квантов с веществом и регистрируется поглощенная в материале детектора энергия, а характеристики, влияющие на вид аппаратного спектра – такие, как световыход сцинтиллятора и шумы ФЭУ, заменяются функциями, получаемыми на основе реальных экспериментальных данных. Эти функции позволяют

создать разброс энергий в полученном при моделировании спектре, аналогичный таковому в реальном детекторе. В случае расчета с использованием такого подхода используются характеристики реального сцинтиллятора, и он может быть использован там, где требуется быстроедействие – например, для расчета эффективности регистрации γ -квантов.

Первый подход был использован в [3], где производилась симуляция переноса оптических сцинтилляционных фотонов в компонентах детекторов, используемых при однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и, соответственно, требовалось создать такую конструкцию, в которой бы были минимальными потери числа фотонов на пути к фотокатоду.

Второй подход был использован в [4], где с помощью симуляции рассчитывалась эффективность регистрации γ -квантов многослойным сцинтилляционным детектором. В данной работе использовались различные сборки из слоев органического сцинтиллятора BC404 толщиной от 1 до 10 мм. Число слоев доходило до 40; это было сделано с целью определения направления прилета γ -квантов. При взаимодействии γ -кванта с материалом детектора электрон, которому была передана энергия, теряет в достаточно тонком слое не всю энергию; в то же время, по оставленной в одном слое энергии можно определить расстояние, пройденное в нем электроном, а фиксируя результаты с нескольких слоев, можно определить энергию γ -кванта.

При создании такой симуляции необходимыми результатами являются эффективность регистрации γ -квантов и спектры энерговыделений в отдельных слоях, следовательно, нет необходимости утяжелять программу расчетом переноса сцинтилляционных фотонов в кристалле по пути к ФЭУ – достаточно использовать заранее известные характеристики сцинтиллятора BC404 и ФЭУ Hamamatsu R7600U-200.

Таким образом, в зависимости от требуемых при проведении расчета результатов, могут быть применены как подход с полным описанием физических процессов в детекторе, так и упрощенный. В данной работе целью является нахождение эффективности регистрации γ -квантов для различных

конфигураций расположения детекторов, в связи с чем оправданным является использование упрощенного подхода к моделированию процесса регистрации γ -квантов.

1.2 Исследуемые реакции

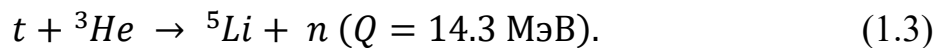
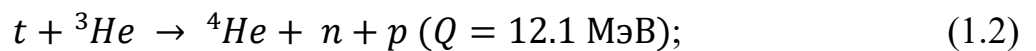
В настоящее время на установке ИДМ-40 производится подготовка к изучению реакции $T(^3\text{He}, \gamma)^6\text{Li}$ с энергией γ -кванта в 15.8 МэВ в диапазоне энергий ионов $^3\text{He}^+$ от 18 до 38 кэВ. Путем экспериментальных исследований выхода реакции планируется получить значения сечения реакции и, соответственно, астрофизического S-фактора. В настоящее время в этой области энергий существуют только теоретические оценки сечения этой реакции; ожидается, что сечение этой реакции будет в районе 10^{-34} - 10^{-33} см² для ионов с энергиями 30-38 кэВ в оптимистичном предположении, что S-фактор для этой реакции не ниже 0.51 кэВ·барн [5]. Следовательно, необходимо построить максимально эффективную систему регистрации γ -квантов высоких энергий.

Сечение реакции связано с S-фактором следующим соотношением:

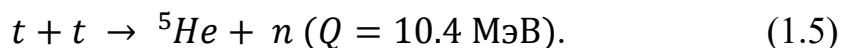
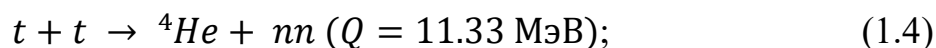
$$\sigma(E) = \frac{\exp[-2\pi\eta]}{E} \cdot S(E), \quad (1.1)$$

где $\eta = \frac{2\pi Z_1 Z_2 e^2}{\hbar^2 v^2}$ – параметр Зоммерфельда, $Z_1 Z_2 e^2$ – произведение зарядов вступающих в реакцию ядер, v – скорость относительного движения сталкивающихся частиц.

Кроме того, реакция взаимодействия ионов $^3\text{He}^+$ с ядрами трития может протекать по нескольким каналам, в том числе:



Исследование реакции $T(^3\text{He}, \gamma)^6\text{Li}$ будет затруднено нейтронным фоном, возникающим в приведенных выше каналах этой реакции [6]. Кроме того, дополнительным источником нейтронного фона при исследовании реакций $T(^3\text{He}, \gamma)^6\text{Li}$, $T(\text{H}, \gamma)^4\text{He}$ является процесс упругого рассеяния ионов ^3He на атомах трития, с передачей энергии ядрам трития и последующими реакциями взаимодействия ядер трития с ядрами трития мишени:



В итоге ожидается высокий уровень нейтронного фона.

Для того чтобы определить эффективность регистрации установкой γ – квантов с такой энергией, было предложено привлечь реакции $T(\text{H}, \gamma){}^4\text{He}$ и $d(\text{p}, \gamma){}^3\text{He}$.

Ранее изученная реакция $d(\text{p}, \gamma){}^3\text{He}$ с $E_\gamma = 5.5 \text{ МэВ}$ была предложена для создания программы, позволяющей моделировать регистрацию γ -квантов детекторами при различной конфигурации их расположения. Затем экспериментальные и полученные при моделировании величины предполагается сравнить и сделать выводы о доработке программы либо, если программа работает корректно, провести ряд расчетных экспериментов и выбрать подходящую конфигурацию, позволяющую наиболее эффективно регистрировать γ -кванты.

Затем программу следует настроить на работу с γ -квантами с энергией $E_\gamma=19.8 \text{ МэВ}$ из реакции $T(\text{H}, \gamma){}^4\text{He}$. Сечение этой реакции при энергии протонов $E_p=10 \text{ кэВ}$ в СЦИ (соответствует 18 кэВ в ЛСК) составляет $\sigma = 4 \cdot 10^{-32} \text{ см}^2$ [7]. Кроме того, как было указано в [7], дифференциальное по углам сечение этой реакции не представляет собой постоянную величину, а значит, выход γ -квантов под разными углами относительно направления прилета протона будет неравномерным. В таком случае, предлагается сравнить полученные в результате расчета спектры с изотропным в 4π распределением вылетающих γ -квантов и спектры с распределением, заданным в [7].

Наконец, расчет методом Монте-Карло в уже отлаженной программе позволит получить надежное значение эффективности регистрации γ -квантов для энергии $E_\gamma = 15.8 \text{ МэВ}$.

2 Экспериментальная установка ИДМ-40 и сопряженное оборудование

Проведение экспериментальных исследований осуществляется на импульсном ускорителе холловского типа ИДМ-40 (рис. 1).

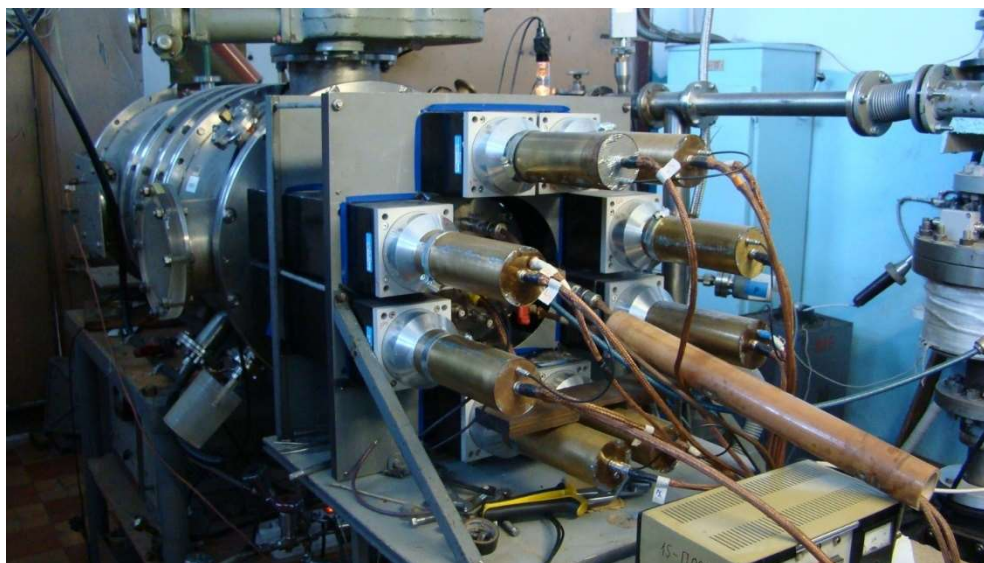


Рисунок 1 - Установка ИДМ-40 с восемью NaI(Tl) детекторами вокруг мишенного узла

Детектирующими устройствами являются 8 детекторов NaI(Tl) с размерами кристаллов $10 \times 10 \times 40 \text{ см}^3$ с ФЭУ Hamamatsu R1307; сигналы с них подаются на входы осциллографов Tektronix DPO 2024, после чего передаются в компьютер и поступают в рабочую программу. В рабочей программе происходит сохранение информации об амплитуде сигнала, номере детектора, на котором он был зарегистрирован и времени регистрации с подачи сигнала на выстрел. Далее подробно будут описаны составляющие части экспериментальной установки.

2.1 Импульсный ускоритель ИДМ-40

Для исследования реакций с низкими ($\sigma = 10^{-36} \div 10^{-30} \text{ см}^2$) сечениями в области ультранизких энергий $\sim 2 - 40 \text{ кэВ}$ была создана установка, способная создавать высокоинтенсивные ($\sim 10-100 \text{ А}$) пучки легких ионов H^+ , D^+ , He^+ в диапазоне длительностей импульса $\sim 1-50 \text{ мкс}$. В используемой установке основным устройством является импульсный источник ускоренных ионов - ионный диод с магнитной изоляцией (ИДМ – 40), схема которого приведена на рис. 2 [2].

Импульсный режим работы ускорителя с относительно высоким значением количества ускоренных частиц за один импульс (до $5 \cdot 10^{14}$ частиц) позволяет значительно упростить задачу с фоновыми измерениями. Сам рабочий импульс длится не более 10 мкс, в течение которых пучок ускоренных ионов падает на мишень и, соответственно, происходит регистрация сигналов детекторов [2].

Фоновые частицы регистрируются в течение такого же промежутка времени, но без подачи пучка. Таким образом, параллельно с накоплением событий с детекторов накапливаются события, обусловленные только внешним фоном. Это является преимуществом установки, так как позволяет более эффективно исключать влияние фоновых частиц за счет короткого времени регистрации событий интересующей реакции.

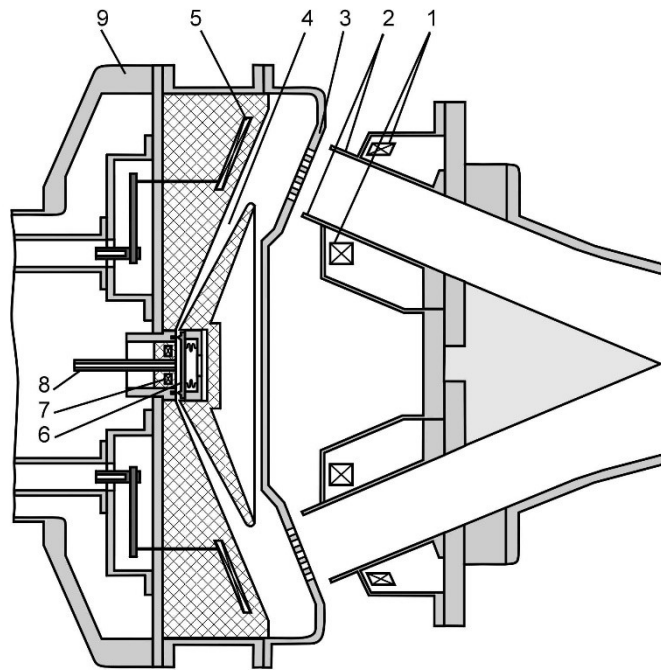


Рисунок 2 - Конструктивная схема холловского источника ионов:

- 1 — катушки изолирующего магнитного поля; 2 — конические катоды; 3 — анод; 4 — сопло Лавалья; 5 — ударная катушка; 6 — импульсный газовый клапан; 7 — катушка клапана; 8 — подвод газа; 9 — анодная полость

Кроме того, для измеряемых энергий около 20 МэВ единственным источником фоновых событий в этой области энергий может быть лишь мюонное космическое излучение. Средние энергопотери космических мюонов при прохождении в NaI составляют $\frac{dE}{dx} = 3.667 \frac{\text{МэВ} \cdot \text{г}}{\text{см}^2} = 4.785 \frac{\text{МэВ}}{\text{см}}$ [8].

Плотность потока мюонов на широте г.Томск (56° с.ш.) составляет $120 \frac{\text{мюонов}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ [9]. При такой плотности потока на сборку детекторов общей площадью $8 \cdot 0.1 \cdot 0.4 = 0.32 \text{ м}^2$ за секунду падает около 38 мюонов; в то же время, регистрация сигналов детекторами происходит за 10 мкс, следовательно, за один выстрел вероятность зарегистрировать мюоны составляет $3.8 \cdot 10^{-5}$.

В таком случае, влияние космического фона на получаемые спектры мало. Такой малый вклад космического излучения в измерения за счет импульсного режима работы является достоинством установки, так как для установок с постоянным потоком падающих частиц исключение фоновых событий достигается за счет снижения интенсивности потока космического излучения при проведении экспериментов под землей.

В ускорителе для генерации предварительной плазмы используется ударная катушка. В этом случае в области вихревого электрического поля, возникающего при разряде колебательного LC - контура (ударная катушка) происходит ионизация рабочего газа, напускаемого с помощью импульсного газового клапана. Металлический корпус, в котором расположены ударная катушка и газовый клапан, закреплен на изоляторе [2].

Через концентрические прорезы в торцевой части корпуса ионизованный газ поступает в область ускорения. Разность потенциалов, определяющая ускоряющее напряжение, прикладывается между корпусом (анод) и заземленным катодом. В катоде встроены магнитные катушки для создания радиального магнитного поля в области ускорения ионов. Магнитное поле необходимо для подавления электронной проводимости (магнитная изоляция) [2].

Ускоренные ионы транспортируются по коаксиальному конусному каналу. Использование конусной геометрии позволяет обеспечить определенную фокусировку ионного потока на мишени. Перед мишенью располагается сетка под отрицательным потенциалом (- 150 В) для очищения ионного потока от электронов и для подавления вторичной ионно-электронной эмиссии из

мишени. Подавление вторичной эмиссии из мишени необходимо для корректного измерения количества падающих на мишень ускоренных заряженных частиц [2].

Продукты исследуемых реакций регистрируются детекторами, расположенными вокруг мишенного узла. В исследуемой реакции используются детекторы на основе кристаллов NaI(Tl) размерами $10 \times 10 \times 40$ см³, находящихся в оптическом контакте с ФЭУ Hamamatsu R1307.

Данные о параметрах ускорителя и сигналы с детекторов записываются на запоминающие осциллографы Tektronix DPO 2024. Информация с осциллографов списывается в ЭВМ и обрабатывается по заданным программам. Программы обеспечивают работу устройства в автоматическом режиме с частотой до 0.1 Гц; обработанные результаты сохраняются в рабочей директории и доступны для дальнейшей обработки.

Для поддержания вакуума в камере ИДМ-40 на уровне не выше 10^{-7} торр и удаления напущенного в камеру при предыдущих выстрелах газа применяются турбомолекулярный насос TMP 403 со скоростью откачки 350 л/с и криогенный CryoPlex8 со скоростью откачки 2500 л/с. Для контроля состава остаточного газа используется квадрупольный масс-анализатор Extorr XT100.

2.2 Тритиевые мишени

При работе с установкой используются мишени, содержащие тритий. Мишени были изготовлены методом магнетронного напыления титана и внедрения трития в его кристаллическую решетку по методу Сивертса.

При одновременном повышении температуры среды и давления газообразного трития в камере напыления повышается растворимость трития в титане, в результате чего образуется устойчивое соединение со стехиометрией $TiT_{1.7}$. В свою очередь, при магнетронном осаждении такого соединения на подложку образуется кристаллическая структура титана, в ячейки которой оказывается внедрен тритий.

Всего изготовитель АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара, г. Москва, предоставил 4 тритиевых мишени с паспортной активностью 366 ГБк, площадью 74 см^2 и толщиной нанесенного слоя 1.5 мкм каждая. Подложкой является молибденовый диск диаметром 97 мм и толщиной 0.2 мм, на одну из торцевых поверхностей которого нанесен слой тритида титана. В ОИЯИ, г. Дубна, было произведено измерение распределения концентрации атомов трития по глубине слоя мишени методом детектирования ядер трития отдачи (ERD-метод) с использованием пучка α -частиц с энергиями 2.3 МэВ, создаваемого с помощью ускорителя Ван-де-Граафа лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Исследование однородности напыления по площади было произведено в НИ ТПУ непосредственно перед началом работ при помощи метода электронно-флуоресцентного анализа. Сущность метода заключается в регистрации характеристического рентгеновского излучения титана, вызываемого электронами, возникающими при β -распаде ядер трития и тормозящимися в слое титана.

Тритий, радиоактивный изотоп водорода, имеет период полураспада $T_{1/2}=12.262$ года; для него характерен β^- -распад с образованием изотопа ^3He . Спектр испускаемых тритием β^- -частиц представлен на рис. 3. Средняя энергия β^- -частиц составляет 5.7 кэВ, энергия пика равна 3.58 кэВ; максимальная равна E_{β}

= 18.6 кэВ [10], чего вполне достаточно, чтобы возбудить характеристические $k\alpha$ и $k\beta$ рентгеновские линии титана с энергиями $E_{k\alpha} = 4.51$ кэВ и $E_{k\beta} = 4.93$ кэВ [11].

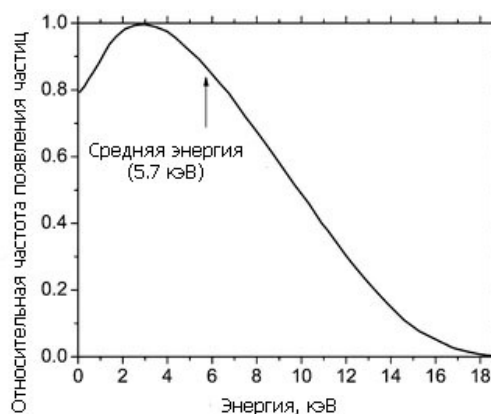


Рисунок 3 – Энергетический спектр электронов β -распада трития [10]

Регистрируя интенсивность испускания этих рентгеновских линий по площади мишени, можно определить активность трития в секторах измерения и, соответственно, равномерность его распределения по площади мишени.

Для регистрации рентгеновских линий применена спектрометрическая система «АЛДАН» (рис. 4) фирмы Аспект на основе полупроводникового кремниевого детектора ППД «БДЕР-КИ-11К» $d=12$ мм, с коллимацией.



Рисунок 4 – Спектрометрическая система «АЛДАН» и тритиевая мишень

В окне детектора расположена бериллиевая пластинка толщиной $h=25$ мкм. В качестве коллиматора используется насадка из фторопласта толщиной $h_{col} = 2$ мм с вырезанным на ее торце по центру отверстием диаметром $d_{col} = 4$ мм. Детектор располагается на подвижной части штатива для его контролируемого

перемещения по высоте и в плоскости измерений. В нижней части штатива располагается подставка, на которую закрепляется мишень.

Перед снятием спектров была проведена энергетическая калибровка и калибровка по ПШПВ спектрометрической системы с помощью источника ^{241}Am по известным линиям характеристического излучения 13.95, 17.75, 20.78, 26.30 кэВ. В дальнейшем были измерены спектры излучения от мишеней. Характеристическое рентгеновское излучение титана, возбуждаемое электронами, появляющимися в результате β -распада трития, обладает следующими энергиями: $E_{K\alpha} = 4.51$ кэВ и $E_{K\beta} = 4.93$ кэВ. Относительные интенсивности этих линий составляют 0.84 и 0.16 соответственно. Таким образом, на типичном снятом спектре (рис. 5) хорошо видны пик ХРИ 4.51 кэВ и пик вылетающих из мишени электронов 3.58 кэВ.

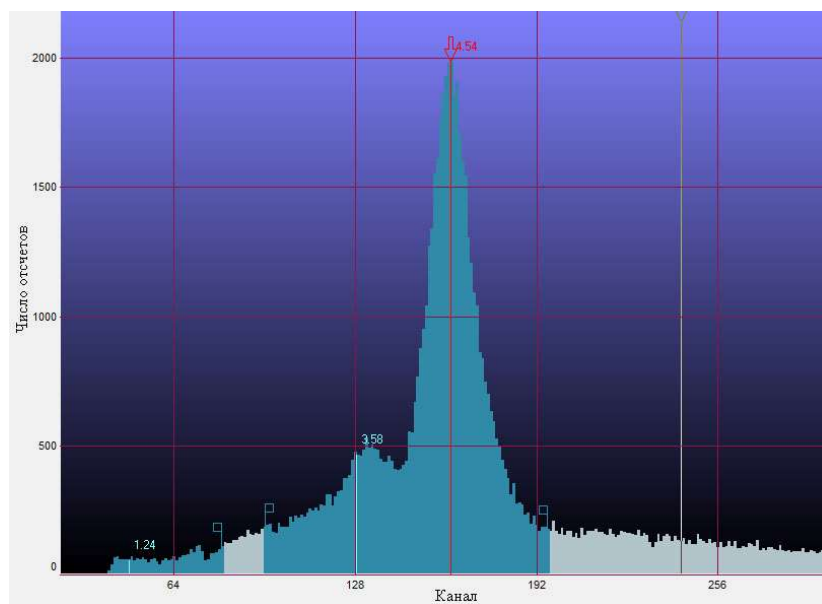


Рисунок 5 – Спектр излучения от мишени TiT №2

Для изучения равномерности распределения трития по площади мишени были разбиты на 5 секторов с равной площадью, в которых проводились измерения. Схема разбиения приведена на рис. 6.

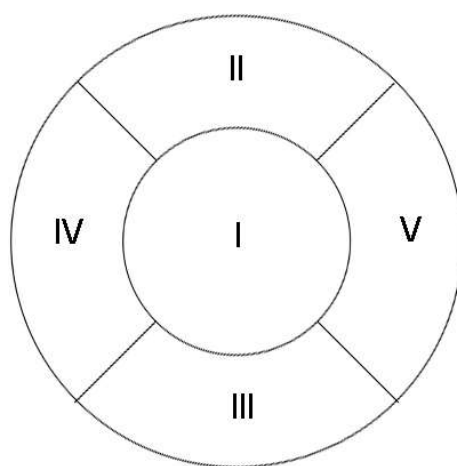


Рисунок 6 – Схема разбивки мишени по секторам

Спектры излучения от мишеней в секторах снимались в течение 10 минут каждый, после чего обрабатывались в программе SpectraLine разработки фирмы Аспект. В процессе обработки выделялся пик ХРИ титана, исключалась подложка и находилась площадь под пиком. Из полученных значений находилась средняя скорость счета в секторе, а затем, с учетом рассчитанной методом Монте-Карло эффективности детектора для энергии рентгеновского излучения 4.51 кэВ ($\epsilon_d = 0.108$) находилась активность трития в секторе и нормировалась на паспортную активность трития в мишени. Таким образом были найдены относительные значения активности и, следовательно, относительное содержание трития в секторах мишеней в процентах. Эти значения сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Значения относительной активности трития в секторах мишеней

	Относительная активность трития в секторе, % от общей			
	Мишень 1	Мишень 2	Мишень 3	Мишень 4
Сектор 1	20.02±0.38	20.07±0.47	19.79±0.41	20.48±0.55
Сектор 2	21.27±0.42	20.46±0.49	18.88±0.39	20.71±0.50
Сектор 3	19.03±0.37	19.39±0.45	21.60±0.47	17.32±0.42
Сектор 4	20.60±0.39	19.20±0.44	20.19±0.44	20.09±0.46
Сектор 5	19.08±0.33	20.88±0.51	19.54±0.40	21.40±0.52

На рис. 7 приведена гистограмма, позволяющая наглядно сравнить однородность тритиевого напыления по секторам мишеней №2 и №3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что все 4 мишени примерно однородны по площади, и концентрации трития в каждом секторе мало

отличаются. Различия малы и могут быть вызваны особенностями процесса напыления мишеней, находиться в пределах возможностей однородности напыления или выбором точек измерения.

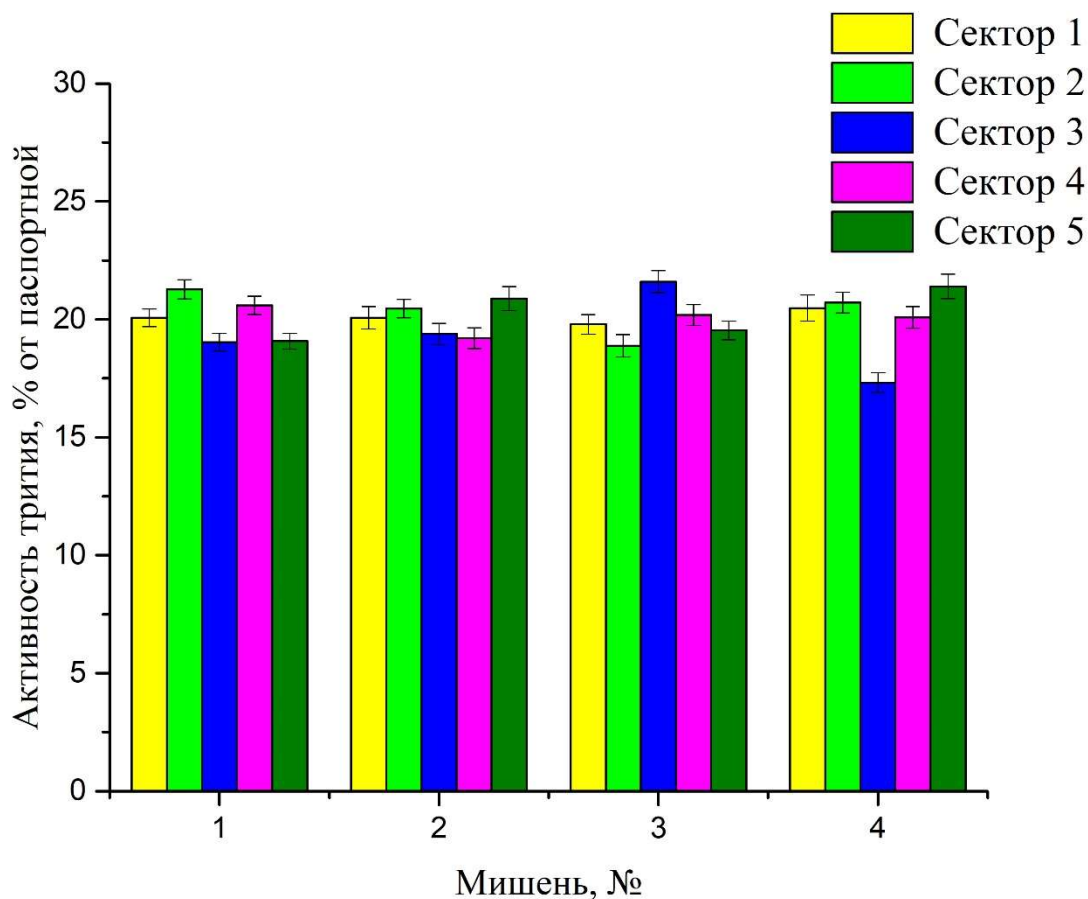


Рисунок 7 – Однородность тритиевого напыления мишеней:

желтым цветом – сектор 1; зеленым – сектор 2; синим – сектор 3;
фиолетовым – сектор 4; темно-зеленым – сектор 5.

На основании этих результатов при моделировании мишень была выбрана однородной [12].

2.3 Эффективность регистрации γ -квантов детекторами

Не все испущенные источником γ -кванты попадают в детектор; кроме того, не все попавшие в детектор γ -кванты могут быть в нем зарегистрированы. Для характеристики детекторов γ -квантов выделяется несколько видов эффективности регистрации; в данной работе при моделировании

рассчитываемой величиной является полная (или абсолютная) эффективность регистрации.

В общем случае полная эффективность регистрации частиц детектором есть произведение геометрической и собственной эффективностей. Геометрическая эффективность есть отношение телесного угла детектора к телесному углу, в котором испускаются частицы (в данном случае 4π) и равна отношению числа частиц, вообще попавших в детектор к числу первичных частиц:

$$\varepsilon_{geom} = \frac{N_{in}}{N_0}, \quad (2.1)$$

где N_{in} – число попавших в детектор частиц, N_0 – число первичных частиц.

Собственная эффективность детектора определяет вероятность поглощения частицы в детекторе и равна отношению числа частиц, зарегистрированных в детекторе, к числу попавших в него частиц:

$$\varepsilon_{in} = \frac{N_{reg}}{N_{in}}, \quad (2.2)$$

где N_{reg} – число зарегистрированных событий, N_{in} – число попавших в детектор частиц.

В данном случае удобнее рассчитывать полную эффективность, не выражая ее через другие величины - как отношение числа зарегистрированных событий к числу первичных частиц:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{geom} \cdot \varepsilon_{in} = \frac{N_{in}}{N_0} \cdot \frac{N_{reg}}{N_{in}} = \frac{N_{reg}}{N_0}, \quad (2.3)$$

где N_{reg} – число зарегистрированных событий, N_0 – число первичных частиц. Также в спектрометрии γ -квантов применяется эффективность по пику полного поглощения – это отношение количества γ -квантов, зарегистрированных детектором в пике полного поглощения (N_a), к количеству γ квантов, испущенных источником (N_0).

$$\varepsilon_a = \frac{N_a}{N_0}. \quad (2.4)$$

В данном случае эффективность по пику полного поглощения представляет малый интерес, так как для γ -квантов с энергиями выше 7 МэВ сечение рождения

электро-позитронных пар в NaI превышает сечения комптоновского рассеяния и фотоэффекта, что видно из рис. 8.

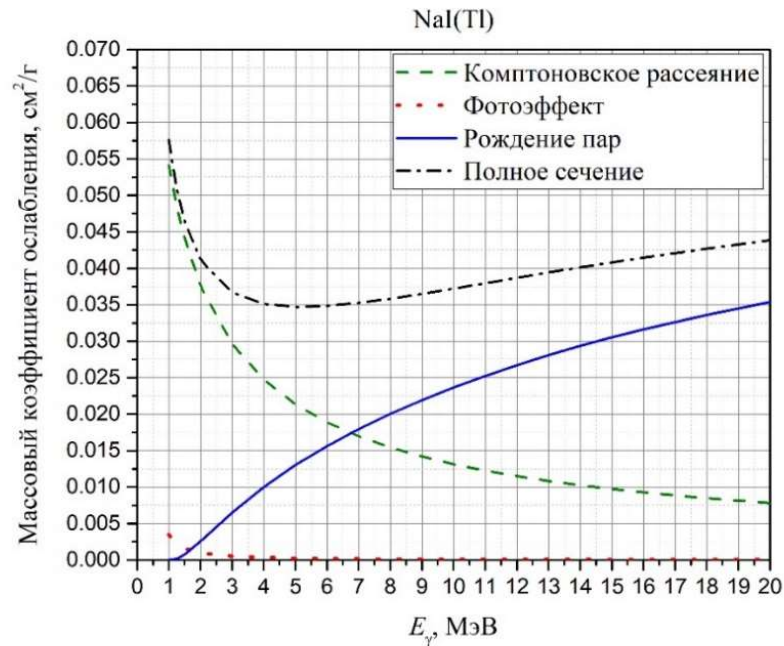


Рисунок 8 – Макроскопические сечения взаимодействия γ -квантов с NaI.

Данные получены на основе [13]

Исходя из того, что при регистрации образовавшейся электрон-позитронной пары могут образоваться три пика с относительными высотами в зависимости от вероятности поглощения аннигиляционных γ -квантов в детекторе, а также из ширины пиков, определяемой разрешением детекторов, имеет смысл измерять эффективность не в одной точке, а по всему спектру - как зависимость от заданной пороговой энергии отношения числа событий в спектре выше заданной пороговой энергии к числу испущенных первичных частиц:

$$\varepsilon_{tot}(E_{th}) = \frac{\sum_{i=C_{th}}^{C_{end}} N_i}{N_0}, \quad (2.5)$$

где $\sum_{i=C_{th}}^{C_{end}} N_i$ – сумма всех событий в спектре начиная с канала C_{th} , соответствующего задаваемой пороговой энергии и до конца спектра; N_0 - число испущенных первичных γ -квантов.

2.4 Конфигурации расположения детекторов

Ускоренные ионы, попадая в ядра мишени, вызывают протекание приведенных выше реакций и возникновение интересующих нас γ -квантов. Из-за малых сечений реакции требуется максимально эффективно регистрировать налетающие γ -кванты с энергиями до 20 МэВ. Как уже было отмечено, в полную эффективность помимо геометрической вклад вносит и собственная – поэтому необходимо выяснить, достаточной ли будет толщина одного детектора для регистрации γ -квантов, или придется уменьшить эффективный телесный угол системы детекторов, поставив детекторы в два слоя.

В экспериментах использующиеся восемь NaI(Tl) детекторов предполагается расположить возле мишенного узла вакуумной камеры тремя возможными вариантами, представленными на рис. 9.

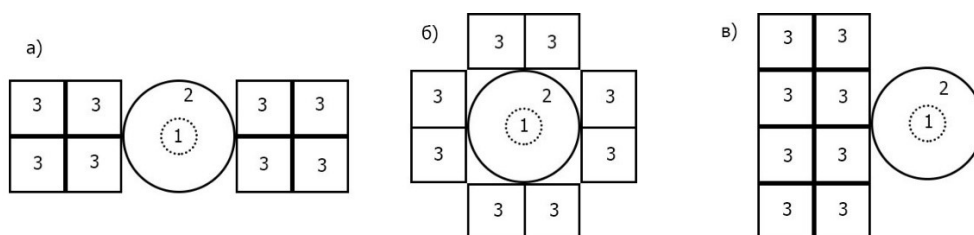


Рисунок 9 - Варианты расположения детекторов в сборках, вид спереди:

1 – мишень; 2 – крышка вакуумной камеры; 3 – детекторы NaI(Tl)

Второй вариант (б) предоставляет наибольший эффективный телесный угол, но при этом на пути каждого γ -кванта встает только один слой NaI толщиной 10 см. Первый (а) и третий (в) варианты созданы так, чтобы за первой «стенкой» детекторов находилась вторая, что должно увеличить вероятность взаимодействия γ -квантов в детекторе за счет большей толщины детектирующего слоя; однако в этом случае падает геометрическая эффективность за счет снижения эффективного телесного угла.

Таким образом, при создании симуляции требуется задать несколько вариантов расположения детекторов.

3 Расчетная часть

3.1 Метод Монте-Карло в ядерной физике

Взаимодействия частиц в микромире имеют вероятностный характер, что в первую очередь обусловлено законами квантовой механики. Исходя из этого, в ядерной физике принято считать экспериментом многократное измерение совокупности случайных процессов – как правило, взаимодействия частиц между собой, с веществами окружающей среды и прохождение первичных частиц или вторичных, появившихся в результате взаимодействия, в материале детектора. Моделирование процессов при этом сводится к многократному моделированию отдельных случайных величин с дальнейшей обработкой – применяется так называемый метод Монте-Карло [14].

Он применяется в первую очередь как инструмент математической статистики – с его помощью возможно получить сведения о распределении случайной величины после произведения ряда испытаний. Однако этот метод требует проведения значительного их количества, а потому опирается на вычислительные возможности компьютеров.

С помощью метода Монте-Карло в ядерной физике определяют пробеги частиц в веществе, времена жизни нестабильных ядер, моделируют число частиц, упавших на детектор и зарегистрированных в нем; он применяется для симуляции разброса световыходов в сцинтилляторе и измерения его разрешения; в физике высоких энергий он применяется для симуляции поведения пучков ускоренных частиц в ускорительной камере [14].

Такое моделирование дает возможность охарактеризовать прохождение частицы через вещество, что применимо при создании детекторов и защитных покрытий при работе с радиоактивными материалами. Этот способ существенно экономит ресурсы и время на разработку приборов для работы в этих областях, так как позволяет оптимизировать их конструкцию, рассчитать ожидаемое значение сигнала и оценить точность измерений, не прибегая к непосредственному созданию или изменению конструкции устройства.

В радиационной медицине компьютерное моделирование применяется для оценки параметров, необходимых для пучковой терапии – конфигурации коллиматора, мощности пучка, энергии частиц и влияния пучка на ткани - как подвергаемые терапии, так и здоровые.

Кроме того, компьютерное моделирование нашло широкое распространение в физике элементарных частиц. Оно предоставляет возможность скорректировать работу ускорителей и детектирующих систем перед запуском, что может быть важно при проведении экспериментов с высокоэнергетическими частицами.

Применение метода Монте-Карло в ядерной физике в первую очередь обусловлено тем, что он позволяет смоделировать взаимодействие излучения с веществом на основе уже имеющихся оцененных данных (например, заранее введенных сечений взаимодействия) и не накладывает ограничений на геометрическое строение исследуемых структур. Он позволяет исследовать сложные физические явления, не поддающиеся аналитическому рассмотрению, либо такие, что повторение их в земных условиях возможно, но очень трудоемко [14].

Таким образом, можно сказать, что использование метода Монте-Карло в ядерных исследованиях представляет собой хорошую альтернативу эксперименту. Это подтверждается распространенностью применения при моделировании задач как прикладной, так и теоретической ядерной физики инструментария Geant4, расчет в котором ведется этим методом.

3.2 Характеристики рабочей среды для производства расчета

Работа с инструментарием Geant4, включающая в себя написание программы, компилирование и ее запуск, осуществлялась на системе со следующими характеристиками и установленными программами:

- операционная система Linux Ubuntu 17.1, установленная на виртуальной машине VMware Player с выделением 1 Гб памяти под симуляцию ОЗУ виртуальной машины;

- Linux-совместимый компилятор `stake` версии 3.4.3;
- инструментарий `Geant4` версии 4.10.06, включающий в себя набор стандартных примеров и собранный на машине при помощи вышеуказанного компилятора;
- визуализатор `OpenGL`.

3.3 Создание геометрической модели установки ИДМ-40

При создании модели установки были выделены отдельные составляющие части.

Поскольку, как уже было определено выше, мишень можно считать однородной по площади, то и при моделировании она была принята однородной. Материалом мишени был выбран молибден.

Так как целью исследования является нахождение эффективности регистрации γ -квантов, то первичными частицами при моделировании имеет смысл задавать именно их. Для этого к объему мишени «привязан» источник γ -квантов с задаваемой энергией, повторяющий ее геометрические размеры. При моделировании были использованы два подхода: первичные γ -кванты испускаются изотропно в 4π – для всех реакций; для реакции отдельно было промоделировано неравномерное угловое распределение вылетающих γ -фотонов, восстановленное из для энергии 10 кэВ по данным, представленным в [7].

В ходе выполнения работ в инструментарии `Geant4` была создана геометрическая модель вакуумной камеры ИДМ-40 с мишенью внутри в соответствии с ее реальными размерами, указанными на рис. 10.

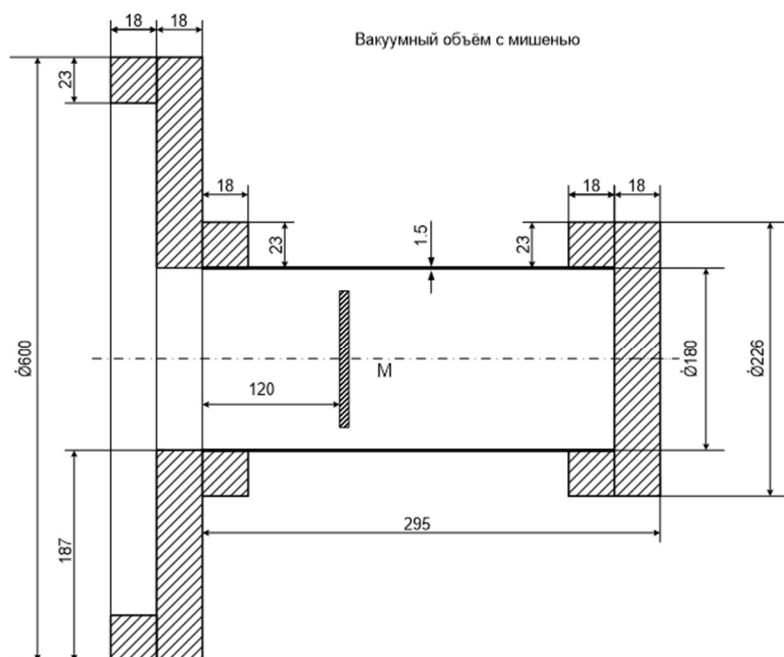


Рисунок 10 – Схематичное изображение продольного разреза вакуумной камеры с мишенью

Стенки мишенного отдела вакуумной камеры представляют собой трубу из нержавеющей стали толщиной 1.5 мм. С одной стороны труба заглушена стальным фланцем толщиной 2 см; с другой стороны она входит в отверстие толстой стальной крышки вакуумной камеры. Крышка представляет собой цилиндр толщиной 2 см и диаметром 60 см; более далекие части вакуумной камеры не представляют интереса и не были смоделированы.

Стальной фланец на трубе мешает придвинуть сцинтилляционные детекторы вплотную к мишенному отделу, из-за чего они располагаются радиально на расстоянии 11 см от центра мишени. Для регистрации γ -квантов на холловском ускорителе ИДМ-40 лаборатории №33 ядерного реактора при НИ ТПУ применяются восемь сцинтилляционных детекторов NaI(Tl) размерами 10x10x40 см каждый. Детектирующие свойства были присвоены всем 8 детекторам по отдельности, так что можно было получать информацию о попавших в них частицах с каждого из них.

Вся сборка в симуляции помещена в вакуумированный кубический объем со стороной 1 м.

Были построены модели, соответствующие трем основным конфигурациям расположения детекторов относительно мишени. Схематичное их изображение представлено на рис. 9.

3.4 Симуляция реального аппаратного спектра

При подаче команды на начало расчета из объема мишени-источника испускаются по одному γ -кванты с заданной при запуске программы энергией. Траектория каждого из них отслеживается, и в случае взаимодействия происходит отслеживание вторичных частиц и суммирование энергопотерь в каждом детекторе. По окончании взаимодействия всех вторичных частиц происходит испускание источником следующей частицы.

При отладке рабочей версии программы после каждого запуска создавался отдельный файл отчета для детекторов, в который записывались все попадающие частицы и их характеристики: их идентификатор, идентификатор родительской частицы, энергия, процесс, в ходе которого они появились и «шаг» начиная с рождения. Шаг – изменение состояния частицы в результате какого-либо взаимодействия с окружающим веществом. В дальнейшем эта информация использовалась для создания алгоритма заполнения массива спектра частиц. На основе вспомогательных файлов стало возможным решить задачи, для решения которых производилось моделирование.

Для симуляции аппаратного спектра, полученные значения энергопотерь в детекторах дополнительно обрабатывались путем их разброса в соответствии с нормальным распределением со средним, равным полученному значению энергии и σ , полученным экспериментально по значениям ПШПВ, полученным при обработке спектров от $AmBe$ источника, зарегистрированных с помощью $NaI(Tl)$ детекторов.

Такая обработка представляется разумной, поскольку форма реальных пиков в спектрах аппроксимируется гауссианом; кроме того, основной вклад в ширину пиков в спектре вносит пуассоновское распределение числа сцинтилляционных фотонов, возникающих при движении регистрируемой

частицы в детекторе. Так как для NaI(Tl) на 1 МэВ поглощенной энергии приходится в среднем 40000 сцинтилляционных фотонов, пуассоновское распределение числа фотонов можно заменить нормальным распределением энергий в спектре с σ , полученным экспериментально.

Для определения ПШПВ пика полного поглощения и, соответственно, нахождения σ распределения, задающего разброс энергий, был снят спектр от AmBe источника, испускающего $9 \cdot 10^4$ нейтронов/сек.

Число испускаемых в секунду γ -квантов с энергией $E_\gamma = 4.438$ МэВ может быть найдено с учетом отношения числа испущенных γ -квантов к числу испущенных нейтронов для AmBe источников $R = 0.591$, приведенного в [15]. Оно будет равно $N_\gamma = N_n \cdot R = 9 \cdot 10^4 \cdot 0.591 = 5.319 \cdot 10^4$ γ -квантов/сек.

Для энергий ниже 7 МэВ в NaI основным типом взаимодействия является комптоновское рассеяние (рис. 8), поэтому пики одиночного и двойного вылета находятся на подложке, включающей в себя комптоновское плато и пик обратного рассеяния.

В связи с этим, опытным путем при симуляции в Geant4 была подобрана функция ПШПВ(E), при которой расчетный спектр максимально соответствует экспериментальному в районе пика полного поглощения (рис. 11). Так как экспериментальный спектр снимался в реальных условиях, то для энергий ниже 2.5 МэВ можно видеть несоответствие спектров. Причина этого несоответствия заключается во вкладе в экспериментальный спектр фоновых событий от встречающихся в природе радиоактивных изотопов ^{40}K ($E_\gamma = 1.460$ МэВ) и ^{208}Tl ($E_\gamma = 2.614$ МэВ).

Кроме того, в спектр вносят вклад реакции неупругого рассеяния и захвата нейтронов от AmBe источника, присутствие которых не учитывается при создании модели. Так, при исследовании взаимодействия нейтронов с окружающими материалами в [16] были обнаружены γ -кванты с пиками в следующих областях спектра: железо – 1.8, 2.05 и 2.6 МэВ; натрий – 1.6 и 2.1 МэВ; кислород – 2.742, 3.089, 3.684, 3.854, 6.13 МэВ; углерод – 4.439 МэВ; азот

– 2.125, 2.313 и 4.445 МэВ. Они также могут регистрироваться детекторами, а при высокой активности испускания нейтронов источником или в ходе протекания побочных реакций при работе на ИДМ-40 - оказывать существенное влияние на вид спектра.

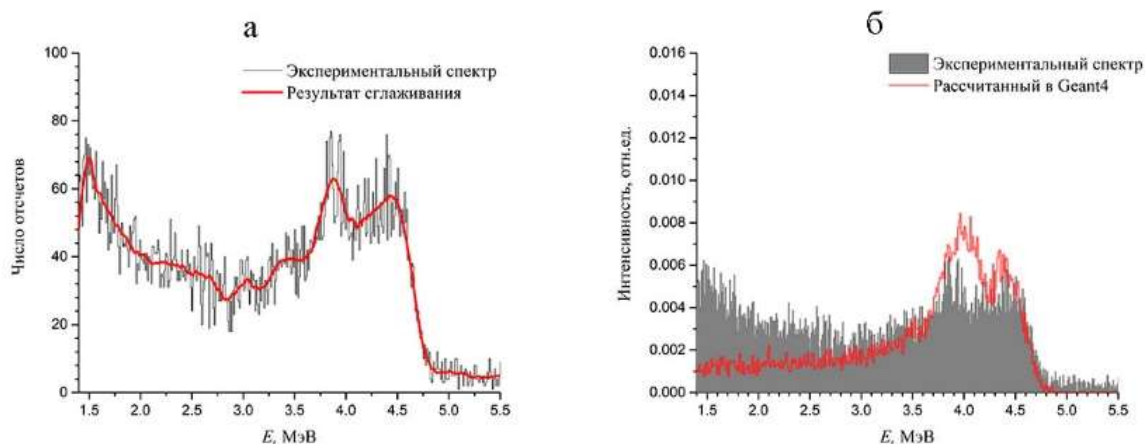


Рисунок 11 – Применение экспериментального спектра от AmBe источника для определения ПШПВ:

а – результат сглаживания экспериментального спектра; б – результат наложения рассчитанного в Geant4 с полученным ПШПВ спектра на экспериментальный

Таким образом, функция ПШПВ нормального распределения поглощенной в сцинтилляторе энергии имеет следующий вид (в абсолютных значениях, МэВ):

$$\text{ПШПВ}(E) = E \cdot 0.056 \cdot \sqrt{\frac{4.438}{E}}. \quad (3.1)$$

Для соответствующих нормальному распределению пиков зависимость $\sigma(E)$ может быть выражена таким образом:

$$\sigma(E) \approx \frac{\text{ПШПВ}(E)}{2.355}. \quad (3.2)$$

Обработанные значения затем записываются в массив. По окончании работы программы вся информация об энергиях, полученных в ходе расчета, выгружается из массива и формируется текстовый файл-таблица, в котором в формате «энергия – число соответствующих записей» формируется спектр.

Помимо этого, также формируются файлы-отчеты, в которых содержатся записи о числе первичных частиц, типе взаимодействия каждого первичного γ -кванта, рожденных вторичных частицах и их энергопотерях в каждом детекторе. В дальнейшем файлы спектров обрабатываются с помощью любой программы, предназначенной для работы с табличными данными, например, Origin.

3.5 Получение расчетных спектров

Перед получением расчетных спектров необходимо было удостовериться в корректности работы программы путем дополнительного сравнения представленных на рис. 12 экспериментального (1) и рассчитанного (2) спектров для 10000 первичных γ -квантов с энергией 5.5 МэВ при одинаковом расположении детекторов. Экспериментальный спектр был получен при конфигурации (б) расположения детекторов с максимальным телесным углом из [1].

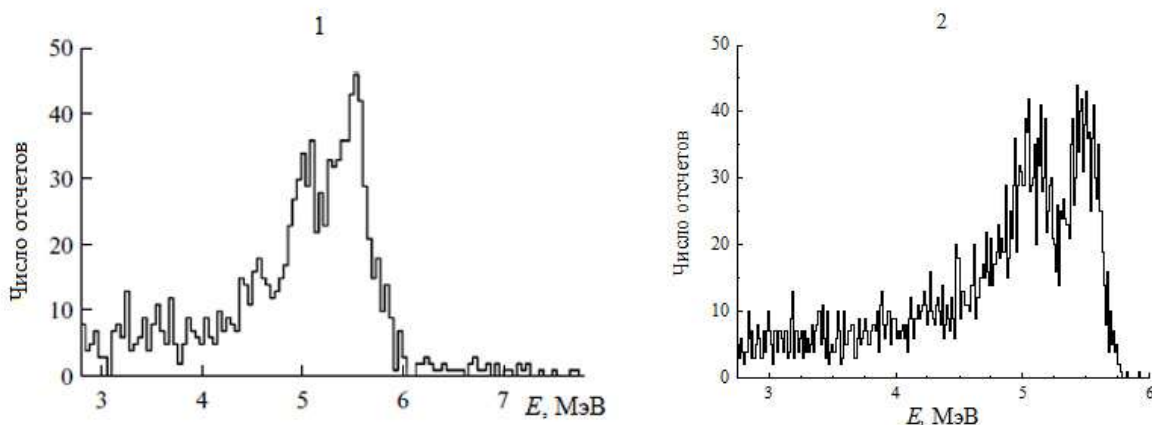


Рисунок 12 – Сравнение экспериментального и расчетного спектров γ -квантов с энергиями 5.5 МэВ:

1 – экспериментальный; 2 – рассчитанный в Geant4

Работа программы была признана удовлетворительной, и в результате были созданы конфигурации для расчета эффективности сборок, представленных на рис. 9 при следующих энергиях γ -квантов:

- 5.5 МэВ, соответствует реакции ${}^2\text{H}(p, \gamma){}^3\text{He}$ – приложение А;
- 19.8 МэВ, соответствует реакции ${}^3\text{H}(p, \gamma){}^4\text{He}$ – приложение Б;
- 15.8 МэВ, соответствует реакции ${}^3\text{H}({}^3\text{He}, \gamma){}^6\text{Li}$ – приложение В.

Для всех конфигураций по полученным спектрам были построены кривые эффективности в зависимости от пороговой энергии. Под эффективностью в данном случае понимается полная эффективность регистрации γ -квантов.

Кроме того, для реакции ${}^3\text{H}(p, \gamma){}^4\text{He}$ рабочая программа была дополнена следующим образом: из [7] была взята информация о неравномерном распределении дифференциального сечения реакции по углу θ . Из этого следовало, что γ -кванты в этой реакции испускаются неизотропно. В связи с этим возникла необходимость в оценке того, насколько существенно отразится на эффективности регистрации поправка на неизотропность испускания γ -квантов.

Распределение γ -квантов по углу θ было получено из [7] на основе приведенных данных о виде зависимости сечения реакции от угла и приведено на рис. 13, где по оси ординат приведены вероятности испускания в определенном направлении. По этой зависимости для Geant4 была создана таблица вида «диапазон углов» - вероятность, используемая при определении направления испускания первичной частицы.

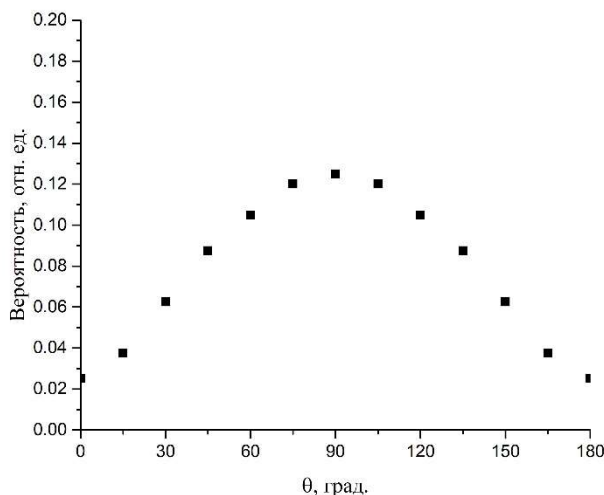


Рисунок 13 – Распределение γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ по углу θ

Неравномерность распределения была реализована следующим образом: когда частица вылетает в направлении угла θ , разыгрывается случайное число от 0 до 1 и сравнивается с приведенным в таблице значением вероятности, которому соответствует угол вылета частицы. Если это случайное число меньше

табличного значения, частица считается испущенной, в противном случае угол ее вылета θ разыгрывается снова [17].

Относительная интенсивность вылета частиц по углу θ в плоскости, параллельной направлению вылета пучка ионов представлена на рис. 14, где $\theta = 0^\circ$ соответствует направлению движения пучка ионов.

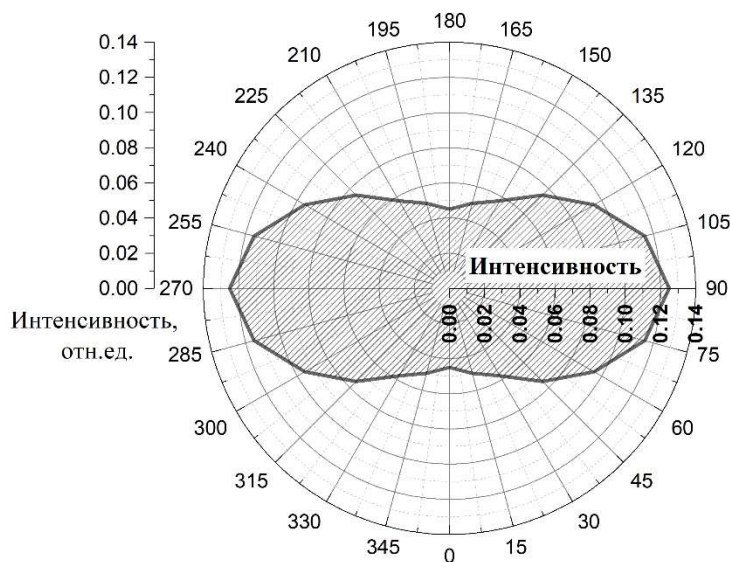


Рисунок 14 – Диаграмма относительной интенсивности вылета γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ по углу θ

В приложении Г приведено сравнение спектров и кривых эффективности регистрации γ -квантов, испускаемых при их изотропном в 4π и неизотропном распределении. Учет анизотропии вылета оказывает видимое влияние на эффективность регистрации – так, во всех случаях для неизотропного источника эффективность регистрации оказалась выше.

В Приложении Д приведено сравнение кривых эффективностей для γ -квантов с разной энергией. Для всех рассмотренных значений энергии первичных γ -квантов наиболее эффективной оказалась сборка (б), что свидетельствует не только о решающей роли геометрической эффективности сборки детекторов (величине телесного угла), но и о достаточности одного 10-см слоя NaI(Tl) для регистрации γ -квантов в диапазоне энергий до 20 МэВ.

В Приложении Е приведен экспериментальный спектр γ -квантов из реакции ${}^3\text{H}(p, \gamma){}^4\text{He}$ с $E_\gamma = 19.8$ МэВ, снятый с одной стопки из 4 детекторов, что соответствует левой стопке детекторов из сборки (а). Из спектра, приведенного на рис. Ж1, видно, что пики в районе 20 МэВ выделяются слабо.

Можно выделить несколько причин, приводящих к затруднению выделения пиков в интересующей области. В первую очередь, так как используются неорганические сцинтилляторы NaI(Tl) с достаточно долгим временем высвечивания (порядка 300 нс), а также используется сумматор, через который сигналы с выхода ФЭУ детекторов идут на осциллограф. Во время выстрела может происходить наложение сигналов, что приводит к искажению амплитуд, появлению ложных событий в спектрах. Во-вторых, имеет место быть «засорение» спектра регистрируемыми γ -квантами, являющимися продуктами реакций неупругого рассеяния или радиационного захвата окружающими материалами нейтронов, возникающих в реакциях взаимодействия трития, выбитого из мишени с тритием, содержащимся в ней [16].

Была предпринята попытка получить спектр зарегистрированных событий только от реакций взаимодействия нейтронов с материалами камеры. Для этого в каждом выстреле мишень бомбардировалась атомами ${}^4\text{He}$, в результате чего из нее выбивались атомы трития, которые затем, в свою очередь, могли, взаимодействуя с тритием мишени, образовать нейтроны. Эти нейтроны затем взаимодействовали с материалами вакуумной камеры и детекторов, и в результате реакций неупругого рассеяния или радиационного захвата образовывались γ -кванты. Полученный спектр приведен на рис. Ж2.

Полученный спектр γ -квантов был вычтен из экспериментального с целью выделения пиков, однако и это не принесло заметных результатов (рис. Ж3), исходя из чего можно заключить, что в районе 20 МэВ влияние реакций, обусловленных нейтронным фоном, мало. Таким образом, для корректного сравнения экспериментального спектра с расчетным для $E_\gamma = 19.8$ МэВ необходимо устранить наложение амплитуд сигналов в эксперименте, либо внести в модель симуляцию наложения.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности, конкурентоспособности и соответствия разработки, предлагаемой в рамках научного исследования, современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Данный раздел предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки в сравнении с конкурентными решениями;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – разработка наиболее эффективной системы регистрации γ -квантов с энергиями до 20 МэВ, возникающих при исследовании реакций слияния легких ядер. Следовательно, требуется создать техническое решение, позволяющее достоверно оценивать эффективность различных конфигураций расположения детекторов в короткие сроки с минимальными затратами ресурсов.

Выполнение расчетов и оценка финансовой- и ресурсоэффективности проводилось в соответствии с [18].

4.1 Оценка коммерческого потенциала проводимого НИ

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В данной работе рассматриваются два варианта определения эффективности регистрации γ -квантов:

Вариант 1 – моделирование работы регистрирующей системы и расчет эффективности методом Монте-Карло с применением свободно распространяемого программного кода Geant4, разработанного в CERN;

Вариант 2 - прямое экспериментальное исследование эффективности регистрации γ -квантов путем проведения экспериментальных запусков на установке ИДМ-40 и накопления реальных аппаратурных спектров.

В оценочной карте сравнены сильные и слабые стороны конкурирующих технических решений.

Сравнительный анализ осуществляется по наиболее важным показателям с помощью экспертной оценки по пятибалльной шкале, где 1 – наихудшая оценка, а 5 – наилучшая оценка соответствия технического решения показателю. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1	Вар. 2
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Быстрота получения результатов	0,15	5	1	0.75	0.15
Достоверность результатов	0,12	2	4	0.24	0.48
Возможность исследования регистрации продуктов реакций по отдельности	0,06	4	2	0.24	0.12
Внедрение дополнительных разнообразных детекторов	0,12	5	4	0.6	0.48
Требования к техническим навыкам	0,05	2	5	0.1	0.25
Возможность проведения параллельного исследования	0,13	5	2	0.65	0.26
Безопасность	0,05	5	4	0.25	0.2
Гибкость	0.04	2	3	0.08	0.12
Экономические критерии оценки эффективности					
Цена	0,09	5	3	0.45	0.27
Предполагаемый срок эксплуатации	0,04	4	4	0.16	0.16
Затраты на ресурсы	0,15	5	2	0.75	0.3
Итого	1	44	34	4.27	2.79

Результаты анализа, представленные в таблице 4.1, позволяют заключить, что наиболее предпочтительным и эффективным способом определения эффективности регистрации γ -квантов является моделирование в

инструментарии Geant4. В то же время, непосредственное экспериментальное определение требует значительных затрат времени и ресурсов, уступает в ряде других критериев ресурсоэффективности.

4.1.2 SWOT-анализ

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Strengths (сильные стороны)	Weaknesses (слабые стороны)
	<p>S1. Позволяет описать практически любой процесс в экспериментальной ядерной физике;</p> <p>S2. Возможность в реальном времени изменять начальные характеристики исследуемых частиц;</p> <p>S3. Позволяет получить расчетный спектр и другие необходимые значения менее чем за 3 часа;</p> <p>S4. Отрисовка траекторий частиц при симуляции и визуализация регистрации;</p> <p>S5. Возможность максимально подробно описать процесс взаимодействия за счет подробного вывода в файл-отчет;</p> <p>S6. Позволяет узнать вклад каждого взаимодействия в отдельности;</p> <p>S7. Расчет можно производить на любом компьютере в любое время.</p>	<p>W1. Малая гибкость: для каждой модели создается отдельная программа;</p> <p>W2. Для работы требуются навыки программирования;</p> <p>W3. Для определения корректности модели требуются экспериментальные данные;</p> <p>W4. Явления, связанные с аппаратурой (наложения), необходимо симулировать с помощью дополнительных алгоритмов.</p>
<p>Opportunities (возможности)</p> <p>O1. Необходимость моделирования перед постановкой экспериментов;</p> <p>O2. Получение сечений реакций перед постановкой экспериментов;</p> <p>O3. Моделирование защиты для реакторов и ускорителей;</p> <p>O4. Введение новых исследовательских установок в ядерной физике;</p> <p>O5. Компьютеризация исследовательских установок.</p>	<p>O1O2O4O5S1S2S3S6S7 – создать программу с блоком готовых типовых моделей и выводом необходимых значений в файл на компьютере для сокращения времени ввода в строй новых установок или отладки уже имеющихся;</p> <p>O1O3O5S1S2S3S4S7 – быстрый расчет характеристик в ядерной медицине для максимально быстрого начала предоставления терапии;</p> <p>O2O4O5S1S2S5S7 – расчет отдельных процессов для сложных научных установок для диагностики возможных проблем при работе с установкой.</p>	<p>O1O4O5W1W2 – приложить понятную инструкцию с типовыми ситуациями для пользователя и предоставить ряд базовых моделей для ядерной физики;</p> <p>O1O2O5W3 – создать базу экспериментальных данных, к которым может обращаться пользователь;</p> <p>O5W2W4 – включить типовые алгоритмы в инструкцию.</p>
<p>Threats (угрозы)</p> <p>T1. На имеющихся установках существуют отлаженные системы расчета значений;</p> <p>T2. Малая заинтересованность в узкоспециализированных программах.</p>	<p>T1S2S3S5S7 – Результаты расчета можно получить в короткие сроки в любое время, кроме того, можно получить дополнительно другие необходимые значения;</p> <p>T2S1S5S7 – Большое количество предлагаемых для расчета процессов позволяет создать программу с широким спектром потенциальных возможностей применения.</p>	<p>T1W3W4 – внесение дополнительных алгоритмов и баз данных расширит возможности программы;</p> <p>T2W1W2 – разработать инструкцию с решениями типовых ситуаций.</p>

Таблица 4.3 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
O1	+	+	+	+	-	+	+
O2	+	+	+	-	+	+	+
O3	+	+	+	+	-	-	+
O4	+	+	+	-	+	+	+
O5	+	+	+	+	-	+	+

Таблица 4.4 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W 3	W4
O1	+	+	+	-
O2	-	-	+	-
O3	-	-	-	-
O4	+	+	-	-
O5	+	+	+	+

Таблица 4.5 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
T1	-	+	+	-	+	-	+
T2	+	-	-	-	+	-	+

Таблица 4.6 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W 3	W4
T1	-	-	+	+
T2	+	+	-	-

4.2 Планирование НИР

4.2.1 Структура работ в рамках НИР

Планирование комплекса предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного научного исследования необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Исходя из вида запланированных работ устанавливается должность исполнителя этой работы. Разработанный список задач и производимых работ в рамках исследования, а также распределение исполнителей по видам исполняемых работ представлен в виде таблицы 4.7.

Таблица 4.7 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель Инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по проведению исследования	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Получение экспериментальных данных для создания модели	Инженер
	6	Подготовка виртуальной рабочей среды и создание прототипа программы на основе экспериментальных данных	Инженер
	7	Оценка соответствия расчетных результатов экспериментальным	Руководитель Инженер
	8	Создание окончательного варианта программы моделирования	Инженер
	9	Набор расчетных спектров	Инженер
Обобщение и оценка результатов	10	Построение полученных спектров	Инженер
	11	Расчет и построение кривых эффективности	Инженер
	12	Сравнение полученных результатов	Руководитель Инженер
Контроль и координирование НИР	13	Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	14	Составление пояснительной записки к программному коду	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости проведения исследования составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников исследования.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ож i}$ определяется по формуле:

$$t_{ож i} = \frac{3t_{min i} + 2t_{max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{min i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой в предположении удачного стечения обстоятельств), чел.-дн.; $t_{max i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой в предположении неудачного стечения обстоятельств), чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} :

$$T_{pi} = \frac{t_{ож i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.8.

4.2.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи. Построенная диаграмма представлена на рис. 15.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.4)$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.5)$$

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.6)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{кал}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2.8 \text{ чел.-дн.}, \quad (4.7)$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i} = \frac{2.8}{1} = 2.8 \text{ раб. дн.}, \quad (4.8)$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1.48. \quad (4.9)$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы инженером на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 1.9 \cdot 1.48 = 2,812 \approx 3 \text{ кал.дн.} \quad (4.10)$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 66 - 1} = 1.28. \quad (4.11)$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 1.6 \cdot 1.28 = 2.04 \approx 2 \text{ кал.дн.} \quad (4.12)$$

Таблица 4.8 - Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
Выбор направления исследований	2	3	5	5	3,2	3,8	1,6	1,9	2	3
Подбор и изучение материалов по теме	-	8	-	12	-	9,6	-	9,6	-	14
Календарное планирование работ по проведению НИР	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2	-
Получение экспериментальных данных для создания модели	-	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4
Подготовка виртуальной рабочей среды и создание прототипа программы на основе экспериментальных данных	-	6	-	14	-	9,2	-	9,2	-	14
Оценка соответствия расчетных результатов экспериментальным	1	1	2	3	1,4	1,8	0,7	0,9	1	1
Создание окончательного варианта программы моделирования	-	10	-	16	-	12,4	-	12,4	-	18
Набор расчетных спектров	-	5	-	9	-	6,6	-	6,6	-	10
Построение полученных спектров	-	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	3
Расчет и построение кривых эффективности	-	2	-	5	-	3,2	-	3,2	-	5

Продолжение таблицы 4.8

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Сравнение полученных результатов	2	3	3	5	2,4	3,8	1,2	1,9	2	3
Контроль качества выполнения работ и консультирование исполнителя	4	-	6	-	4,8	-	4,8	-	6	-
Составление пояснительной записки к программному коду	-	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4
Итого	12	43	23	79	16.4	57.4	12.9	57.4	17	78

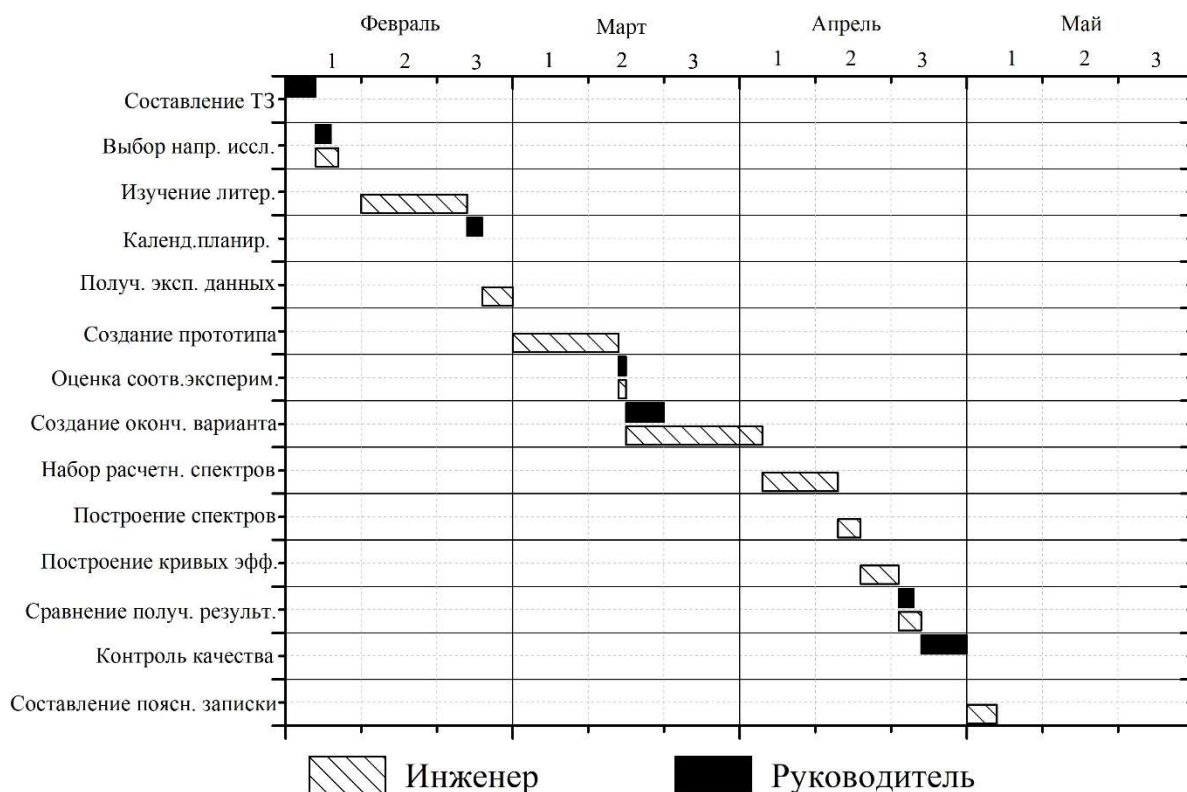


Рисунок 15 - Диаграмма Ганта

Суммарная длительность деятельности каждого исполнителя в календарных днях представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	94
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	78
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	17

4.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 4.16.

4.3.1 Материальные затраты на НИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (15 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	Затраты, руб.
Книга учета	шт.	1	100	115
Бумага офисная	уп.	1	350	403
Калькулятор инженерный CASIO FX-991 EX	шт.	1	1550	1782
Лента измерительная Ргум 150 см	шт.	1	230	265
Канцелярские товары	уп.	1	150	175
Итого, руб.	2740			

4.3.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. При приобретении спецоборудования учтены затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. В таблице 4.11 приведены сведения о затратах на него.

Таблица 4.11 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, руб.	Общая стоимость, руб.
1. Делитель напряжения HR-SAT 3 kV	1	1590	1829
2. Мультиметр НАМА EM393	1	1150	1321
Итого	3150		

Т.о., общие затраты на опытный образец составили $2740 + 3150 = 5890$ руб.

4.3.3 Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость исследовательской работы входят

отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов. В таблицу 4.12 внесены сведения о закупочной стоимости имеющегося в лаборатории оборудования и сроке его службы.

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Источник ионизирующих излучений ИБН-241-7-1	1	10	856	856
2	Детектор сцинтилляционный NaI(Tl) 10x40x40 см	8	10	64	512
3	Осциллограф Tektronix TDS 2024B	1	10	454	454
4	Ноутбук ASUS VivoBook 17 X712	1	5	45	45
Итого:					1 млн 867 тыс. руб.

В таблице 4.13 представлены затраты на амортизационные отчисления в ходе текущей работы.

Таблица 4.13 – Суммарные затраты амортизационных отчислений

№	Наименование оборудования	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Срок полезного использования, лет	Срок пользования в рамках проекта, дн.	Амортизационные отчисления, руб.
1	Источник ионизирующих излучений ИБН-241-7-1	856	10	4	938
2	Детектор сцинтилляционный NaI(Tl) 10x40x40 см	512	10	4	561
3	Осциллограф Tektronix TDS 2024B	454	10	4	498
4	Ноутбук ASUS VivoBook 17 X712	45	5	58	1430
Итого:					3427 руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.13)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot d, \quad (4.14)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; d – время использования, дн.

Рассчитаем амортизацию для источника ИБН-241-7-1, с учётом, что срок полезного использования 10 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0.1. \quad (4.15)$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Источник ИБН-241-7-1:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot m = \frac{0.1 \cdot 856000}{365} \cdot 4 = 938 \text{ руб.}, \quad (4.16)$$

Сцинтилляционные NaI(Tl) детекторы, 8 шт.:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot m = \frac{0.1 \cdot 512000}{365} \cdot 4 = 561 \text{ руб.}, \quad (4.17)$$

Осциллограф Tektronix TDS 2024B:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot m = \frac{0.1 \cdot 454000}{365} \cdot 4 = 498 \text{ руб.}, \quad (4.18)$$

Ноутбук ASUS VivoBook 17 X712:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{365} \cdot m = \frac{0.2 \cdot 45000}{365} \cdot 58 = 1430 \text{ руб.}, \quad (4.19)$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 938 + 561 + 498 + 1430 = 3427 \text{ руб.}$$

Полученные значения сведены в Таблицу 4.13.

4.3.4 Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью исследовательской работы и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.20)$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 8).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{58110 \cdot 10,3}{246} = 2433,1 \text{ руб.}, \quad (4.21)$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 16); M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{30420 \cdot 11,2}{213} = 1599,5 \text{ руб.}, \quad (4.22)$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 29800 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 58110 \text{ руб.}, \quad (4.23)$$

Для инженера:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 15600 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 30420 \text{ руб.}, \quad (4.24)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.14 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.15 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{ТС}$, руб	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб.дн.	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	29800	0,3	0,2	1,3	58110	2433,1	17	43162,7
Инженер	15600	0,3	0,2	1,3	30420	1599,5	58	92771,0
Итого:								134133,7

4.3.5 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0.15 \cdot 43162.7 = 6204.4 \text{ руб.}, \quad (4.25)$$

Для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0.15 \cdot 92771.0 = 13915.6 \text{ руб.}, \quad (4.26)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

4.3.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0.3 \cdot (43162.7 + 6204.4) = 14270 \text{ руб.}, \quad (4.27)$$

Для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0.3 \cdot (92771 + 13915.6) = 32006 \text{ руб.}, \quad (4.28)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.3.7 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом составляют:

$$Z_{накл} = (\text{сумма ст. 1 ... 6}) \cdot k_{нр} = (2740 + 3150 + 3427 + 134133.7 + 20120 + 46276) \cdot 0.2 = 41969.2 \text{ руб.} \quad (4.29)$$

где k_{nr} – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

Статьи								
Амортизация	Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисlenia на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
3427	2740	3150	134133.7	20120	46276	209846.7	41969.2	251815.9

4.4 Определение ресурсоэффективности исследования

4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения 2, 3 были выбраны ближайшие аналоги:

1. Реализация исполнения программного кода с применением встроенного компилятора `stake` в ОС Linux. Этот вариант исполнения работы был выбран в качестве основного. Несмотря на то, что в данном варианте не предусмотрены специальные инструменты для оценки быстродействия программы или облегчающие написание кода, встроенный компилятор не требует дополнительных ресурсов компьютера, позволяет быстро пересобрать рабочую версию программы из исходного кода. Такое решение рассчитано на опытных пользователей. Кроме того, для его работы требуется Unix-подобная ОС (в работе была использована Linux Ubuntu, установленная на виртуальной машине

VMWare Workstation). Сама ОС, виртуальная машина и компилятор распространяются бесплатно, поэтому итоговые затраты на научное исследование составили 251815.9 руб.

2. Реализация исполнения программного кода с применением рабочей среды Microsoft Visual Studio PRO. Этот вариант исполнения работы позволяет запускать программный код на уже установленной ОС Microsoft Windows. Помимо этого, использование рабочей среды позволяет в реальном времени отслеживать ошибки в написании кода и исправлять их, оценивать быстродействие программы, потребляемую память компьютера, защищать компьютер от некорректных действий кода путем прерывания его исполнения. В то же время, годовая лицензия Microsoft Visual Studio PRO стоит 84000 рублей, что увеличивает затраты на научное исследование до 335815.9 руб.

3. Реализация исполнения программного кода с применением рабочей среды C++ Builder Rio Professional. Этот вариант исполнения работы позволяет запускать программный код на различных ОС, включая Windows и Unix-подобные системы (Linux Ubuntu). В этом варианте также использование рабочей среды повышает удобство написания кода, позволяет совершать оценку быстродействия программы в реальном времени. Также лицензия на использование этой рабочей среды предоставляет доступ к технической поддержке и снимает ограничения на распространение созданных в ней продуктов. С учетом стоимости лицензии (99000 руб.), затраты на научное исследование составят 350815 руб.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} ; \quad (4.30)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского работы (в т.ч. аналогов).

Рассчитаем значения интегрального финансового показателя для различных вариантов исполнения:

$$\text{Вариант 1: } I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{251815.9}{350815.9} = 0.718 ; \quad (4.31)$$

$$\text{Вариант 2: } I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{335815.9}{350815.9} = 0.957 ; \quad (4.32)$$

$$\text{Вариант 3: } I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{350815.9}{350815.9} = 1. \quad (4.33)$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности исследовательской работы, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i ; \quad (4.34)$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент для характеристики; b_i – бальная оценка варианта исполнения, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик исполнения исследования, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.17.

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения исследования

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки	Бальная оценка системы TDM-M	Бальная оценка системы R1500
1. Контроль качества кода	0.1	2	5	5
2. Простота использования	0.2	3	4	5
3. Быстрота внедрения обновлений в программу	0.3	5	4	4
4. Потребление ресурсов компьютера	0.2	5	3	3
5. Доступность для рядового пользователя	0.1	5	2	2
6. Система контроля версий	0.1	2	5	5
Итого:	1	4	3.8	4

Расчет интегрального показателя для используемого варианта исполнения исследования:

$$I_{p1} = 0.1 * 2 + 0.2 * 3 + 0.3 * 5 + 0.2 * 5 + 0.1 * 5 + 0.1 * 2 = 4 ; \quad (4.35)$$

Расчет интегрального показателя для альтернативных вариантов исполнения:

$$I_{p2} = 0.1 * 5 + 0.2 * 4 + 0.3 * 4 + 0.2 * 3 + 0.1 * 2 + 0.1 * 5 = 3.8 ; \quad (4.36)$$

$$I_{p3} = 0.1 * 5 + 0.2 * 4 + 0.3 * 4 + 0.2 * 3 + 0.1 * 2 + 0.1 * 5 = 4 . \quad (4.37)$$

4.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Интегральный показатель эффективности определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{р1}}{I_{исп.1}^{финр}} = \frac{4}{0.718} = 5.57 ; \quad (4.38)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность исполнения исследовательской работы и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 4.18). К примеру, для исполнения 2 сравнительная эффективность ($E_{ср,2}$):

$$E_{ср,2} = \frac{I_{испi}}{I_{исп1}} = \frac{3.97}{5.57} = 0.712 ; \quad (4.39)$$

Таблица 4.18 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,718	0.957	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4	3.8	4
3	Интегральный показатель эффективности	5.57	3.97	4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,712	0,718

Таким образом, из результатов анализа можно заключить, что выбранный вариант исполнения исследования является наиболее ресурсоэффективным по сравнению с аналогами.

5 Социальная ответственность

В данной работе рассматривается компьютерное моделирование регистрации сцинтилляционными детекторами γ -квантов, генерируемых при исследовании реакций синтеза легких ядер на холловском линейном ускорителе ИДМ-40, расположенном при лаборатории №33 ИЯР НИ ТПУ. Результаты моделирования, помимо теоретического, представляют интерес в прикладной ядерной физике - используемый программный код может быть применен при исследовании эффективности регистрации γ -квантов в тех случаях, когда ее экспериментальное нахождение сопряжено с трудностями.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Производственная безопасность при работе с ускорителями

Согласно [19], на территории Российской Федерации устанавливаются следующие допустимые пределы доз облучения в результате использования источников ионизирующего излучения для работников: средняя годовая эффективная доза равна 0,02 Зв или эффективная доза за период трудовой деятельности - 1 Зв; допустимо облучение в годовой эффективной дозе до 0,05 Зв при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 0,02 Зв.

Оценка радиационной безопасности осуществляется по следующим основным показателям: характеристика радиоактивного загрязнения окружающей среды; анализ обеспечения мероприятий и выполнения норм по радиационной безопасности; вероятность радиационных аварий и их масштаб; степень готовности к эффективной ликвидации радиационных аварий и их последствий; анализ доз облучения, получаемых отдельными группами населения от источников ионизирующего излучения; число лиц, подвергшихся облучению выше установленных пределов доз облучения [19].

При обращении с источниками ионизирующего излучения организации обязаны планировать и осуществлять мероприятия по обеспечению радиационной безопасности; проводить работы по обоснованию радиационной безопасности новой продукции, технологических процессов и производств,

являющихся источниками ионизирующего излучения; осуществлять систематический производственный контроль за радиационной обстановкой на рабочих местах, выбросом и сбросом радиоактивных веществ; проводить контроль и учет индивидуальных доз облучения работников, подготовку и аттестацию по вопросам обеспечения радиационной безопасности руководителей и исполнителей работ, специалистов служб производственного контроля; организовывать проведение предварительных и периодических медицинских осмотров персонала; регулярно информировать персонал об уровнях ионизирующего излучения на их рабочих местах и о величине полученных ими индивидуальных доз облучения [19].

Социальные гарантии за повышенный риск и возмещения вреда, причиненного радиационным воздействием здоровью лиц, привлекаемых для ликвидации последствий радиационной аварии, устанавливаются законодательством РФ [19]. К работе на ускорителе допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, отнесенные Приказом руководителя организации к категории персонала группы А, прошедшие обучение по правилам работы на ускорителе и по радиационной безопасности, прошедшие инструктаж по радиационной безопасности. Женщины должны освобождаться от работы на ускорителе, связанной с воздействием ионизирующих излучений, на весь период беременности и грудного вскармливания ребенка.

В учреждении, где ускоритель используется в стационарных условиях, должны быть предусмотрены следующие помещения: рабочая камера, обеспечивающая возможность безопасного проведения работ; пультовая площадью не менее 15 м², соответствующая требованиям технической документации на ускоритель, вспомогательные помещения, необходимые для обеспечения работы ускорителя и осуществления технологического процесса.

Помещения для размещения оборудования ускорителя, требующие усиленных нижних перекрытий или фундамента, как правило, располагаются на первом или цокольном этажах либо в подвальном помещении (ниже уровня

земли). Пол в помещениях, где установлено высоковольтное оборудование ускорителя, следует покрывать электроизолирующим материалом.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом. Рабочие места с ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 – 2,0 м [20].

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне вытянутых ног не менее 650 мм, его поверхность должна иметь коэффициент отражения 0,5 – 0,7. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 – 800 мм [20].

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 – 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы [20].

Рабочее кресло должно быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с закругленным передним краем; регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 – 550 мм и углам наклона от +15 до - 5 град.; угол наклона спинки

в вертикальной плоскости в пределах ± 30 градусов; стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной 50 – 70 мм [20].

5.2 Анализ вредных и опасных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня их воздействия на исследователя

При работе на ПЭВМ и эксплуатации установки ИДМ-40 могут возникнуть вредные и опасные факторы, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Возможные опасные и вредные факторы, возникающие при работе

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Моделирование	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	<ul style="list-style-type: none"> СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [3]
2. Превышение уровня шума	-	+	<ul style="list-style-type: none"> СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы [4]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	<ul style="list-style-type: none"> СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [5]
4. Электромагнитное излучение	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [6]
5. Психофизиологические факторы	+	-	<ul style="list-style-type: none"> СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [2]
6. Повышенный уровень ионизирующих излучений	-	+	<ul style="list-style-type: none"> СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. [7]
7. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	<ul style="list-style-type: none"> ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [8]

5.2.1 Изменение показателей микроклимата в рабочем помещении

Может возникнуть из-за долгосрочного пребывания персонала в помещении с установкой и нагрева токоведущих частей установки.

Неподходящие условия микроклимата могут привести к снижению работоспособности и концентрации работников, способствуют заболеваемости. Кроме того, присутствие озона при разрядке высоковольтных конденсаторов неблагоприятно для организма в силу его высокой окислительной способности.

Эффективными мероприятиями по оздоровлению воздушной среды можно считать правильную организацию вентиляции, отопления и кондиционирования помещения. В зале с рабочей установкой и в компьютерном помещении допускается естественная вентиляция помещения, так как их объем превышает 40 м³ [21]. Удаление озона из рабочей зоны также осуществляется естественным путем – потоками воздуха. Центральная система отопления вместе с естественной вентиляцией через окна и двери поддерживает оптимальные параметры микроклимата в лаборатории, соответствующие приведенным в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Оптимальные показатели микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0.1
Теплый	23-25	40	0.1

5.2.2 Превышение уровня шума в рабочем помещении

При работе установки источниками постоянного шума являются подключенные турбомолекулярный и криогенный насосы. Помимо этого, в ходе рабочего процесса при открытии газового клапана и при разрядке высоковольтных конденсаторов слышны щелчки.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает утомляемость и способен привести к ошибкам в ходе выполнения работ. Кратковременные интенсивные шумы могут привести к механическим повреждениям органов слуха и других внутренних органов.

В соответствии с санитарными нормами [22], при проведении научных исследований максимальный уровень шума не должен превышать 50 дБ.

Наиболее эффективной мерой снижения шума при работе с установкой является удаление рабочей зоны от насосов, производящих постоянный шум и от ускорителя, являющегося причиной кратковременных интенсивных звуковых импульсов на комфортное для инженера расстояние.

Используемые при создании симуляции модели компьютеров и ноутбуков являются малошумящими. В помещении с компьютером отсутствуют источники шума выше 50 дБ, поэтому, согласно [22] дополнительные меры по шумоизоляции не требуются.

5.2.3. Недостаточная освещенность рабочего места

В рабочем помещении естественный свет освещает не все пространство, так как часть пространства загорожена стеллажами с оборудованием и самой установкой. Недостаточная освещенность или наоборот, слишком яркий свет, блики снижают работоспособность работника, ухудшают способности различать детали, заставляют напрягать зрение и снижают концентрацию.

Стол вместе с расположенным компьютером располагается возле окна, свет падает с правой стороны, что позволяет достаточным образом освещать рабочее пространство лишь в дневное время.

Согласно [23], освещенность рабочей зоны для лабораторий, а также при работе с ЭВМ должна составлять не менее 500 лк.

Для компенсации недостатка естественного освещения в рабочем помещении, а также для создания достаточной освещенности рабочего места необходимо создать систему комбинированного освещения, являющегося сочетанием общего и местного так, чтобы освещенность рабочей зоны соответствовала нормам [23].

5.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. При работе на установке ИДМ-40 происходит кратковременная (10 мкс) подача импульса тока

на открытие газового клапана и ударную катушку. Вихревое электрическое поле, возникающее при подаче импульса тока на ударную катушку, вызывает ионизацию газа в вакуумной камере. Генератор импульсов экранирован.

Помимо этого, между анодом и катодом внутри вакуумной камеры установки от источника высоковольтного напряжения приложено электростатическое поле напряженностью не выше 300 В/м. Вакуумная камера представляет собой замкнутый объем со стенками из нержавеющей стали; таким образом, электростатическое поле в межэлектродном промежутке и вихревое поле от ударной катушки полностью экранируется стенками камеры.

ФЭУ Hamamatsu R1307 также питаются от этого же источника высоковольтного напряжения. Кабели питания ФЭУ экранированы медной оплеткой и дополнительно заключены в толстостенную металлическую трубку. Источник высоковольтного напряжения, питающий межэлектродный промежуток и ФЭУ детекторов, также экранирован.

Предельно допустимая величина электромагнитного воздействия от установки на человека составляет менее 0,2 мкТл. Это значение входит в допустимый порог санитарных норм электромагнитного излучения [24].

Экран и системные блоки ЭВМ также производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать таблице 5.3 [24].

Таблица 5.3 - Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

5.2.5 Психофизиологические факторы

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Трудовая деятельность работников непромышленной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональную активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развитию утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [20].

5.2.6 Повышенный уровень ионизирующих излучений

В установке используется мишень, содержащая β -радиоактивный тритий. Также, помимо этого, в ходе эксплуатации объекта исследования за счет протекания реакций слияния легких ядер происходит генерация γ -квантов с

энергиями до 20 МэВ и нейтронов с энергиями до 11 МэВ, а при торможении электронов генерируется рентгеновское излучение.

Под действием ионизирующего излучения может происходить множество нарушений работы организма, вплоть до нарушения свертываемости крови, снижения иммунитета и т.д.

Согласно [25], допустимая среднегодовая объемная активность трития для персонала не должна превышать $4.4 \cdot 10^5$ Бк/м³. Источником трития является мишень, находящаяся в герметичной вакуумной камере установки. Пробег электронов со средней энергией 5.7 кэВ, выделяющихся при распаде трития, не превышает 6 мм в воздухе и 0.2 мкм в железе.

Выделяющееся при их торможении в веществе мишени характеристическое рентгеновское излучение титана имеет энергию 4.51 кэВ. В то же время, энергии электронов недостаточно для возбуждения характеристического рентгеновского излучения в железе. Таким образом, все рентгеновское излучение в установке обладает энергией ниже 10 кэВ.

Согласно [26], для ослабления потока рентгеновского излучения энергией до 10 кэВ в 10^8 раз достаточно листа стали толщиной 0.1 мм. Исходя из этого, можно заключить, что электроны, вылетающие из мишени, и рентгеновское излучение полностью задерживаются 2-мм стальными стенками вакуумной камеры по бокам и 2-см стальными фланцами в направлении рабочей зоны.

На основе экспериментальных данных и исходя из значений сечений исследуемых реакций [1, 5, 7] установлено, что при каждом «выстреле» интенсивностью 10^{14} ионов, падающих на мишень, в 4π образуется порядка единиц γ -квантов с энергиями до 20 МэВ и не более 1-2 нейтронов. Всего за рабочий день производится около 200 выстрелов с частотой 1 выстрел в 30 секунд. При такой интенсивности испускания нейтронов активация рабочей среды и элементов конструкции ускорителя маловероятна.

Кроме того, сам ускоритель отделен от зоны управления стальной дверью; при включении работает оповещающая сигнализация.

Наиболее эффективной мерой защиты исследователя от воздействия ионизирующего излучения является защита расстоянием – удаление рабочей зоны управления достаточно далеко от ускорителя таким образом, чтобы уменьшить вероятность попадания в рабочую зону продуктов реакций – γ -квантов и нейтронов.

При выполнении моделирования на ПК воздействие рентгеновского излучения на пользователя исключено за счет использования жидкокристаллических мониторов (без ЭЛТ).

5.2.7 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

В рабочем помещении осуществляется проведение работ с источниками переменного напряжения до 3 кВ и постоянного до 40 кВ.

Опасность поражения электрическим током заключается в его воздействии на организм человека – механическом, термическом, химическом и биологическом. За счет действия электрического тока на мышечные ткани может происходить их непроизвольное судорожное сокращение, что особенно опасно для сердца. При прохождении тока через организм биологические жидкости могут подвергаться электролизу, что приводит к изменению их состава. Термическое поражение может привести к тяжелым ожогам.

Помещение для работы с высоковольтными источниками должно соответствовать требованиям безопасности: в нем не должны присутствовать токопроводящие полы и источники токопроводящей пыли; относительная влажность не должна превышать 75%, а температура – 35 °С; также необходимо исключить возможность одновременного прикосновения к металлическим заземленным элементам и металлическим корпусом [27].

В этих целях требуется не только обеспечить надлежащую изоляцию токоведущих частей, но и защитить их от разрушения изоляции, заключив проводку в защитную оболочку и закрепив вне путей прохождения персонала. Помимо этого, необходимо регулярно производить осмотр оборудования на предмет его исправности.

Питание компьютера осуществляется посредством подключения его к сети переменного напряжения амплитудой 220 В. Помещение с компьютером также относится к безопасным за счет отсутствия опасных факторов, приведенных выше. Соответственно, меры для исключения воздействия фактора аналогичны уже приведенным.

5.3 Экологическая безопасность.

В работе на установке ИДМ-40 проводится изучение реакций синтеза легких ядер. Наибольший потенциальный вред может принести мишень с тритиевым напылением с паспортной активностью 366 ГБк. При каждом выстреле из мишени выбивается до 10^{11} ядер трития; за день количество выбитых ядер трития возрастает до 10^{12} - 10^{13} ядер, что соответствует активности в 1.78 кБк.

Откачанный газ адсорбируется поглотителем из активированного угля в криогенном насосе в течение дня; после окончания рабочего сеанса происходит регенерация насоса, в ходе которой накопившийся газ размораживается и, увеличиваясь в объеме, возвращается обратно в вакуумную камеру. При следующем запуске тритий вновь адсорбируется панелями из активированного угля.

Сама по себе вакуумная камера герметична, и радиоактивный тритий при стандартной работе с установкой не может ее покинуть. В то же время, при проведении ремонтных работ происходит разгерметизация вакуумной камеры. Таким образом, тритиевые мишени представляют угрозу для атмосферы. Отработанные тритиевые мишени после извлечения из камеры заключаются в герметичный стальной контейнер и отправляются на хранение в сейф – следовательно, влияние на литосферу и гидросферу со стороны мишеней минимально.

Для снижения влияния содержащегося в камере трития на атмосферу, необходимо выполнить ряд предприятий по снижению их активности в соответствии с [28]:

- осуществлять выдержку отходов в камере для снижения активности со

временем;

- осуществлять фильтрацию отходов с помощью адсорбентов при откачке газов внутри камеры турбомолекулярным насосом до включения криогенного.

При работе на установке ИДМ-40 используются генераторы высоковольтного напряжения и ПЭВМ (также используются при моделировании системы регистрации).

Влияние эксплуатации остального оборудования на окружающую среду минимально, а наибольший вред от них в работе – потребление электроэнергии. Однако их производство и утилизация составляют серьезную проблему. Так, при производстве ПЭВМ и других устройств используются тяжелые, щелочноземельные металлы, ртуть, пластик и стекло, что без должной утилизации по окончании службы попадает в природу и остается в не переработанном виде от века до полутора тысяч лет.

Мероприятия, позволяющие сохранять экологическую безопасность, находясь на рабочем месте:

- Правильная утилизация ПЭВМ и других систем, а также их комплектующих;
- Использование энергосберегающих ламп для освещения помещения и их правильная утилизация;
- Использование аккумуляторов вместо солевых батареек во вспомогательном оборудовании – например, мультиметрах.

Снижение уровня загрязнения окружающей среды возможно за счёт более эффективного и экономного использования электроэнергии самими потребителями. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии.

Из этого можно заключить о необходимости стремления к снижению энергопотребления, разработке и внедрению систем с малым энергопотреблением, ответственного относиться к утилизации различных устройств, т.к. они могут разлагаться в окружающей среде от десятков до сотен лет.

5.4 Анализ вероятных ЧС, разработка порядка действий и обоснование мер по ликвидации их последствий

5.4.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [29].

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнём (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов).

К причинам электрического характера относятся:

- короткое замыкание;
- перегрузка проводов;
- искрение;
- статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

Причины возникновения короткого замыкания:

- ошибки при проектировании;
- старение изоляции;
- увлажнение изоляции;
- механические перегрузки.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС

Пожарная безопасность помещения должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями [30].

Пожарная защита должна обеспечиваться применением средств пожаротушения, а также применением автоматических установок пожарной сигнализации.

Должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- обеспечение эффективного удаления дыма, т. к. в помещениях, имеющих оргтехнику, содержится большое количество пластиковых веществ, выделяющих при горении летучие ядовитые вещества и едкий дым;
- обеспечение правильных путей эвакуации;
- наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации. План эвакуации представляет собой заранее разработанную схему, на которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила

поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации.

Существует порядок действий и правила поведения в случае возникновения пожара:

- 1) Незамедлительно позвонить в аварийную службу или МЧС (112);
- 2) Поставить в известность руководство (дежурного);
- 3) По возможности принять меры для эвакуации людей и меры для тушения пожара.

Заключение

В рамках выполнения данной работы было произведено нахождение эффективности регистрации γ -квантов, образующихся при исследовании реакций синтеза легких ядер на установке ИДМ-40, сборками сцинтилляционных NaI(Tl) детекторов. Для трех вариантов расположения детекторов относительно мишенного узла были получены кривые эффективности, позволяющие оценить эффективность регистрации для реальных детекторов.

Получены следующие результаты:

- создан программный код, позволяющий получать путем моделирования методом Монте-Карло спектры, аналогичные аппаратным спектрам от реальных детекторов;

- на основе экспериментальных спектров получена аналитическая зависимость ширины пиков для детекторов NaI(Tl) от энергии γ -квантов, используемая в программном коде для симуляции аппаратных спектров;

- получены расчетные спектры γ -квантов с энергиями 5.5; 19.8 и 15.8 МэВ с изотропным в 4π источником для различных вариантов расположения детекторов;

- для энергии 19.8 МэВ получены также спектры для неизотропного источника;

- по полученным спектрам построены кривые эффективности регистрации как зависимость полной эффективности от пороговой энергии;

- на основании кривых эффективности установлено, что для энергии 19.8 МэВ учет анизотропии вылета γ -квантов существенен, так как эффективность регистрации для всех вариантов расположения детекторов выше в случае неизотропного распределения γ -квантов от источника;

- для всех энергий наиболее эффективной является геометрия (б), в которой 8 детекторов расположены вокруг мишенного узла по двое, образуя детектирующий слой толщиной 10 см;

- исходя из этого, для γ -квантов с энергиями до 20 МэВ решающий вклад в эффективность регистрации дает эффективный телесный угол детекторов, а не их собственная эффективность (следовательно, толщина детектирующего слоя в 10 см является достаточной в таком диапазоне энергий);

- для нахождения вклада в реальный спектр продуктов взаимодействия нейтронов с окружающими материалами и эффектов наложения амплитуд в детекторах планируется в будущем дополнить рабочую программу.

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации исследования как наиболее предпочтительного и рационального по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 94 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 78 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 17;

3. Составлен бюджет научного исследования, позволяющий оценить затраты на его реализацию, которые составляют 251815.9 руб;

4. По факту оценки эффективности НИ, можно сделать следующие выводы:

- значение интегрального финансового показателя НИ составляет 0,718, что является показателем того, что НИ является финансово выгодным по сравнению с аналогами;

- значение интегрального показателя ресурсоэффективности НИ составляет 4, по сравнению с 3.8 и 4 для других вариантов;

- значение интегрального показателя эффективности НИ составляет 5.57, по сравнению с 3.97 и 4, и является наиболее высоким, что означает, что было

выбрано наиболее эффективный вариант исполнения научно-исследовательской работы.

Выводы по разделу «Социальная ответственность»:

В данном разделе были рассмотрены основные вопросы, касающиеся обеспечения безопасности при работе с установкой ИДМ-40 и моделировании на ПЭВМ.

Выявление и анализ опасных и вредных факторов позволяют снизить их воздействие на персонал. Определение источников экологической опасности и разработка мер по защите окружающей среды способствует уменьшению пагубного влияния в процессе проведения исследований на окружающую среду.

Была определена наиболее вероятная чрезвычайная ситуация, которая может возникнуть на рабочем месте при проведении исследований (пожар), также приведены мероприятия по предотвращению ЧС и порядок действий во время ее возникновения.

Список использованной литературы

1. Effect of pd and dd Reactions Enhancement in Deuterids TiD_2 , ZrD_2 and Ta_2D in the Astrophysical Energy Range / V.M. Bystritskii [et al.] // Physics of Particles and Nuclei: Scientific Journal. – 2016. – Vol. 13, No. 1. – pp. 79-97.
2. Pulsed ion hall accelerator for investigation of reactions between light nuclei in the astrophysical energy range / V.M. Bystritsky [et al.] // Physics of Particles and Nuclei: Scientific Journal. — 2017. — Vol. 48, iss. 4. — pp. 659–679.
3. A Geant4 simulation code for simulating optical photons in SPECT scintillation detectors / S. Lo Meo [et al.] // Journal of Instrumentation: Scientific Journal. – 2009. – Vol. 4, iss. 7. – P07002.
4. BC404 scintillators as gamma locators studied via Geant4 simulations / M. L. Cortes [et al.] // Journal of Instrumentation: Scientific Journal. – 2014. – Vol. 9, iss. 5. – C05049-C05049.
5. J. Madsen. CNO and 6Li from big-bang nucleosynthesis – Impact of unmeasured reaction rates // Physical Review D: Scientific Journal. – 1990. – Vol. 41, iss. 8. – pp. 2472 – 2478.
6. Reaction $T({}^3He, \gamma){}^6Li$ in the Energy Range 0.5 – 11 MeV / S. L. Blatt [et al.] // Physical Review: Scientific Journal. – 1968. – Vol. 176, iss. 4. – pp. 1147 – 1153.
7. ${}^3H(p, \gamma){}^4He$ reaction below $E_p = 80$ keV / R. S. Canon [et al.] // Physical Review C: Scientific Journal. – 2002. – Vol. 65, iss. 044008. - pp. 1-7.
8. D. E. Groom. Muon stopping power and range tables 10 MeV – 100 TeV / D. E. Groom, N. V. Mokhov, S. I. Striganov // Atomic Data and Nuclear Data Tables: Scientific Journal. – 2001. – Vol. 76, iss. 2. - LBNL-44742, pp. 1 – 37.
9. P. K. F. Grieder. Cosmic Rays at Earth. Researcher’s Reference Manual and Data Book // Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2001. – pp. 440 – 454.
10. L. M. Langer. The Beta-Spectrum of Tritium and the Mass of the Neutrino / L. M. Langer, R. J. D. Moffat // Physical Review: Scientific Journal. – 1952. – Vol. 88, iss. 4. – pp. 689 – 694.

11. Astrophysical S -factor of $T(^4\text{He}, \gamma)^7\text{Li}$ Reaction at $E_{cm} = 15.7$ keV / V.M. Bystritsky [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters: Scientific Journal. — 2017. — Vol. 14, iss. 4. — pp. 560–570.
12. Метод и результаты исследования тритиевых мишеней / Д. Чумаков [и др.] // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине (ФТПНПМ-2019) : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 30 сентября - 04 октября 2019 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2019. — [С. 160].
13. NIST XCOM: Photon Cross Sections Database – SRD 8 [Электронный ресурс] – National Institute of Standards and Technology, 2019. - Режим доступа: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>
14. Метод Монте-Карло в теории переноса излучений: учебное пособие / А.М. Кольчужкин, А.В. Богданов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 120 с.
15. S. Croft. The use of neutron intensity calibrated $^9\text{Be}(\alpha, n)$ sources as 4438 keV gamma-ray reference standards // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Scientific Journal. – 1989. – Vol. 281. - pp. 103-116.
16. Measurement of 14 MeV neutron-induced prompt gamma-ray spectra from 15 elements found in cargo containers / B. Perot [et al.] // Applied Radiation and Isotopes: Scientific Journal. – 2008. – Vol .66. - pp. 421-434.
17. Geant4 User's Guide for Application Developers [Электронный ресурс] – Geant4 Collaboration, 2019. – Режим доступа: <http://cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/IntroductionToGeant4/fo/IntroductionToGeant4.pdf>
18. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова и др.. –Томский политехнический университет. –Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. –36 с.

19. О радиационной безопасности населения (с изменениями на 19 июля 2011 года) [Текст]: Федеральный закон от 09 янв. 1996 г. № 3-ФЗ // Собрание законодательства. – 1996. – № 3, (15 янв.). – ст. 141.
20. Об утверждении СанПиН 2.2.2/2.4.2732–10 "Изменения № 3 к СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" [Текст]: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 03 сен. 2010 г. № 116 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2010. – № 46.
21. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Текст]: Взамен СН микроклимата производственных помещений, утвержденных Минздравом СССР от 31.03.86., N 4088-86.; введ. 1996-10-01. – М.: Минздрав России, 2001. – 20 с.
22. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы [Текст]: Взамен СН № 3223-85, СН № 3077-84, "Гигиенических рекомендаций по установлению уровней шума на рабочих местах с учетом напряженности и тяжести труда" N 2411-81.; введ. 1996-10-31. – М.: Минздрав России, 1997.
23. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [Текст]: Введ. 2017-05-08. – М.: Стандартинформ, 2018. – 121 с.
24. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности (с Изменением N1) [Текст]: Введ. 1986-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 5 с.
25. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [Текст]: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.

26. СанПиН 2.6.1.2748-10 Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при работе с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения. [Текст]: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 21 с.
27. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. [Текст]: Введ. 2019-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
28. СП. 2.6.1.2612–10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [Текст]: – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
29. ГОСТ Р 22.0.05-94/ Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения [Текст]. – введ. 1994-12-26. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 12 с.
30. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1) [Текст]: - Введ. 1992-06-30. – М.: Стандартинформ, 2006. – 64 с.

Приложение А

Результаты расчета для γ -квантов с $E_\gamma = 5.5$ МэВ

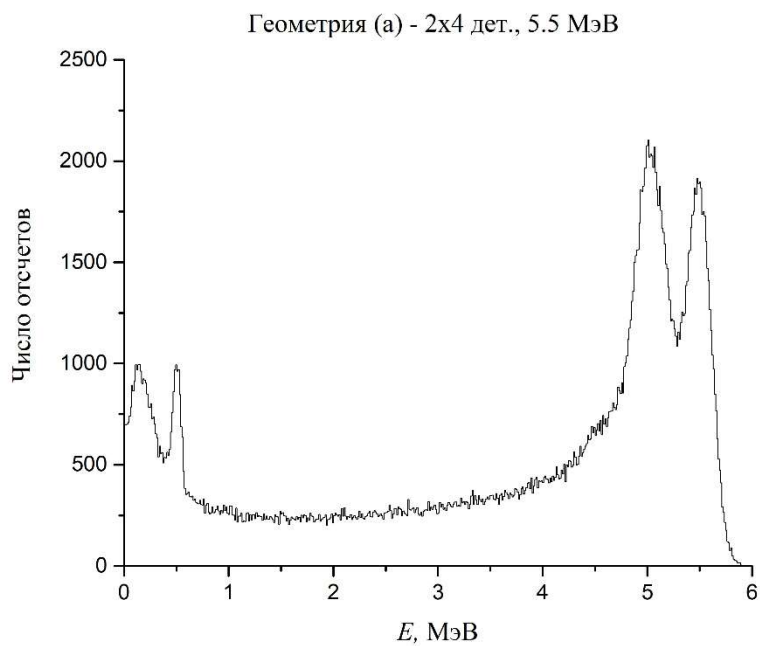


Рисунок А1 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 5.5 МэВ в геометрии (а)

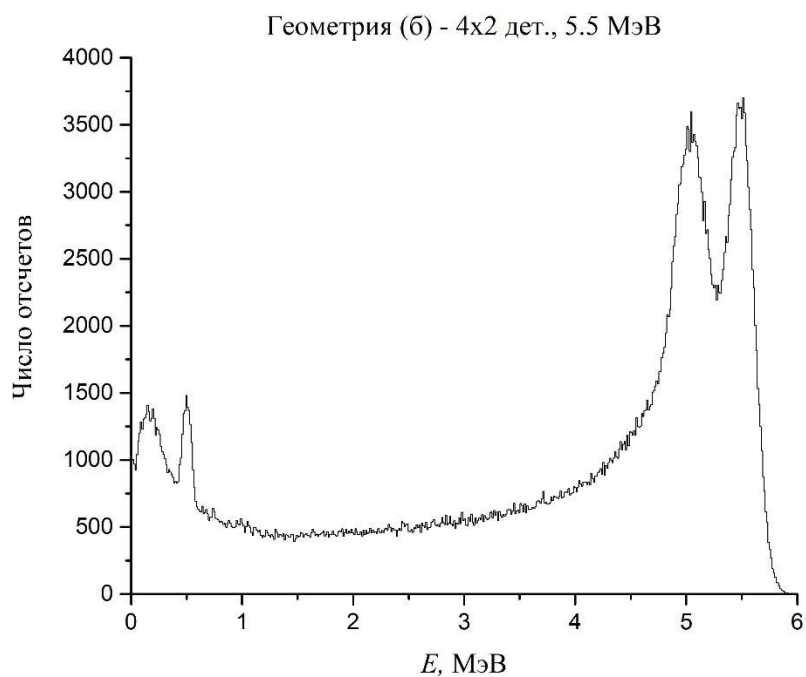


Рисунок А2 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 5.5 МэВ в геометрии (б)

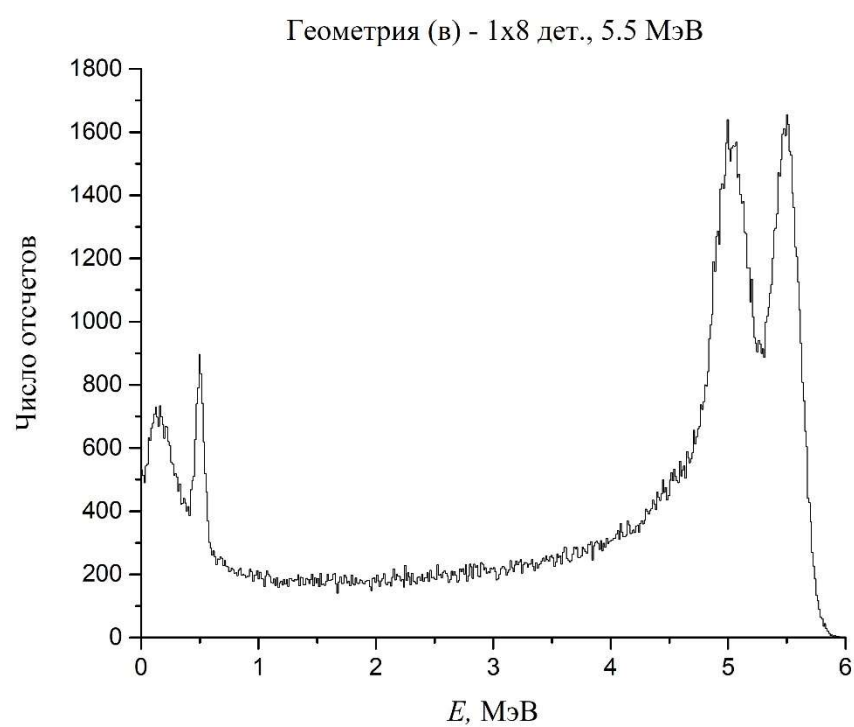


Рисунок А3 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 5.5 МэВ в геометрии (в)

Приложение Б

Результаты расчета для γ -квантов с $E_\gamma = 19.8$ МэВ

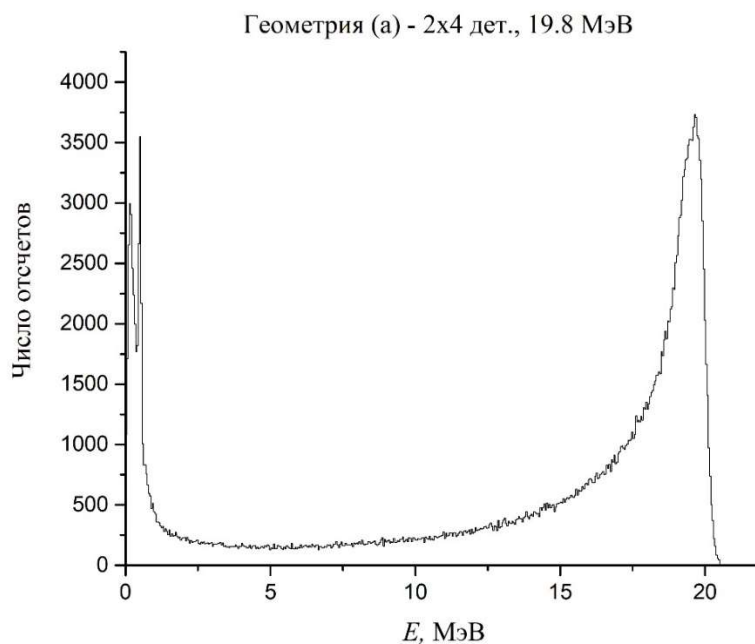


Рисунок Б1 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 19.8 МэВ в геометрии (а) с изотропным источником

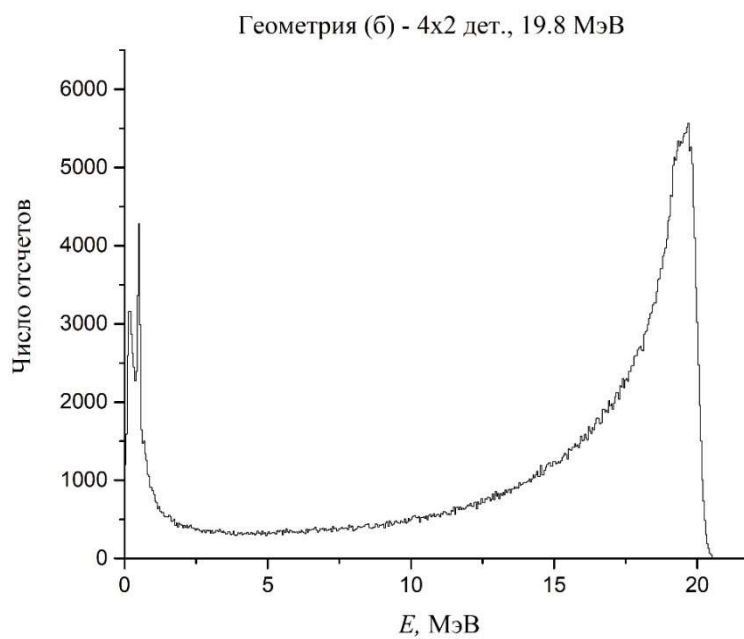


Рисунок Б2 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 19.8 МэВ в геометрии (б) с изотропным источником

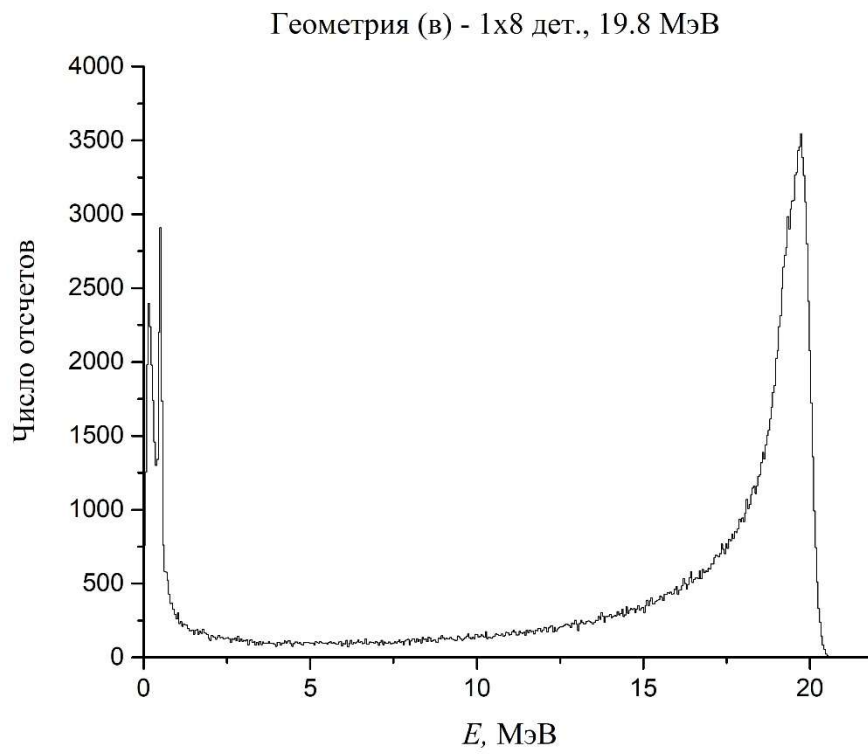


Рисунок Б3 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 19.8 МэВ в геометрии (в) с изотропным источником

Приложение В

Результаты расчета для γ -квантов с $E_\gamma = 15.8$ МэВ

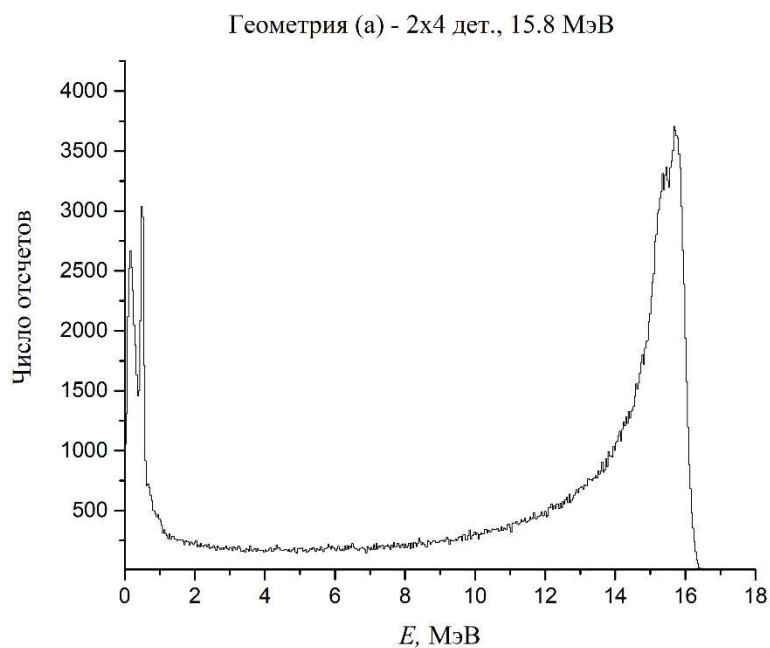


Рисунок В1 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 15.8 МэВ в геометрии (а)

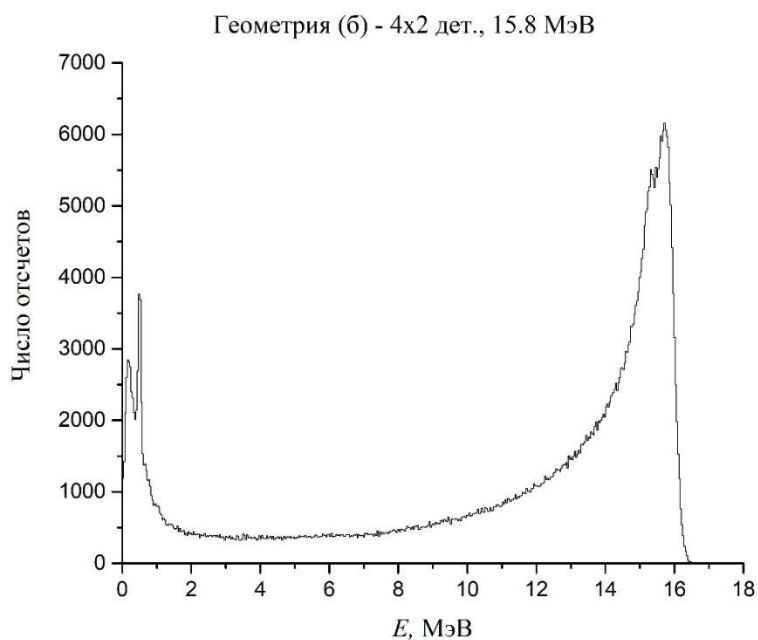


Рисунок В2 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 15.8 МэВ в геометрии (б)

Геометрия (в) - 1x8 дет., 15.8 МэВ

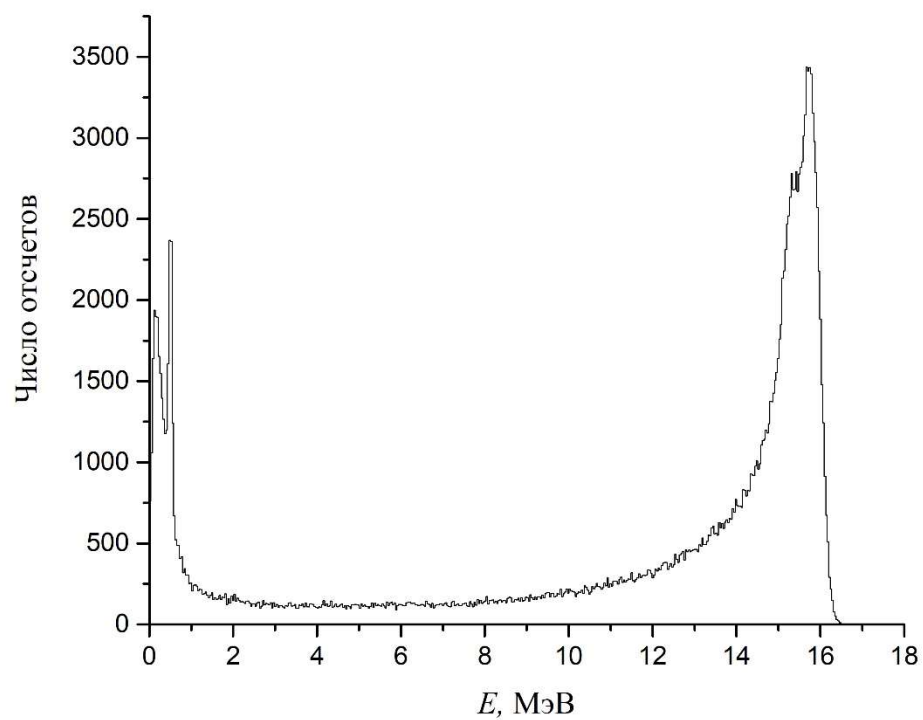


Рисунок В3 – Расчетный спектр для 1 млн. γ -квантов с энергией 15.8 МэВ в геометрии (в)

Приложение Г

Сравнение расчетных эффективностей регистрации и спектров γ -квантов для изотропного и неизотропного источников с $E_\gamma = 19.8$ МэВ

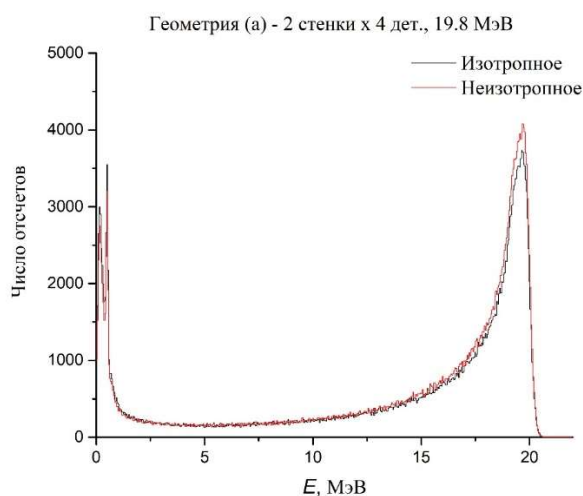


Рисунок E1 – Расчетные спектры γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ в геометрии (а) – «две стенки»: черным цветом – для изотропного источника; красным цветом – для анизотропного источника

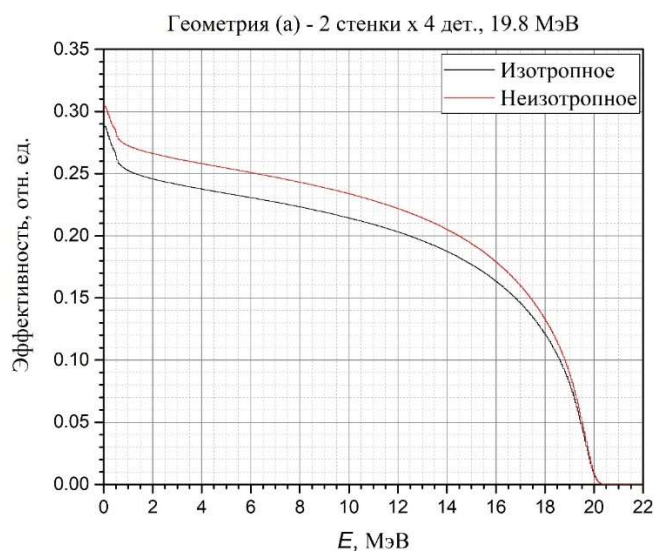


Рисунок E2 – Сравнение кривых эффективности регистрации γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ в геометрии (а) – «две стенки»: черным цветом – для изотропного источника; красным цветом – для анизотропного источника

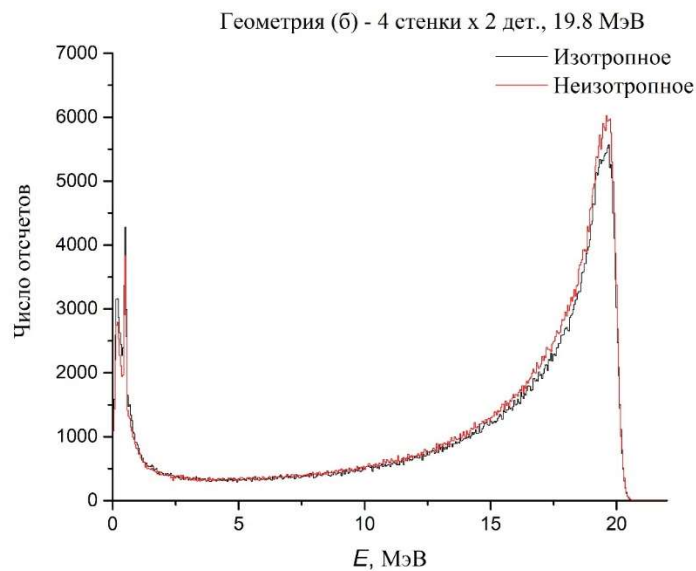


Рисунок Е3 – Расчетные спектры γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ в геометрии (б) – «4 стенки»:

черным цветом – для изотропного источника; красным цветом – для анизотропного источника

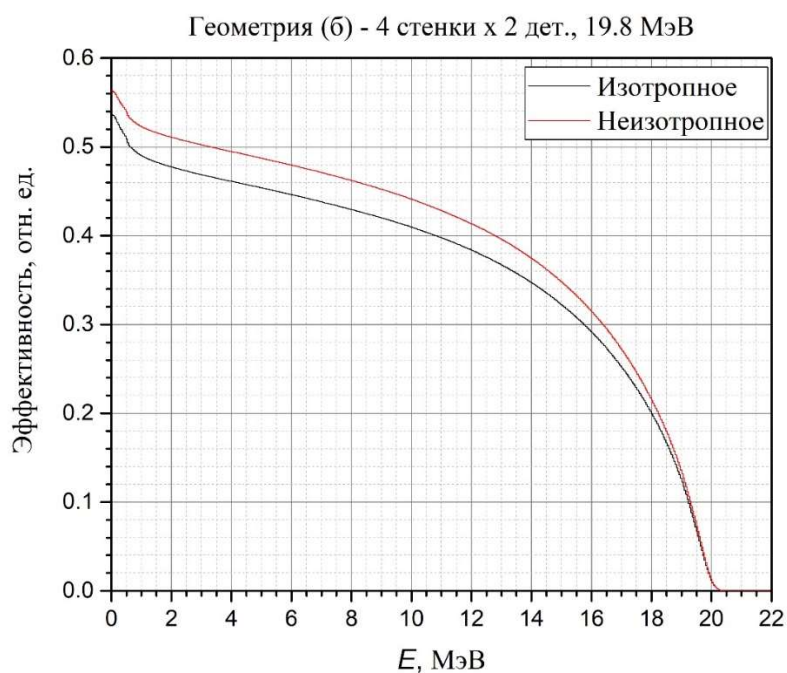


Рисунок Е4 – Сравнение кривых эффективности регистрации γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ в геометрии (б) – «4 стенки»:

черным цветом – для изотропного источника; красным цветом – для анизотропного источника

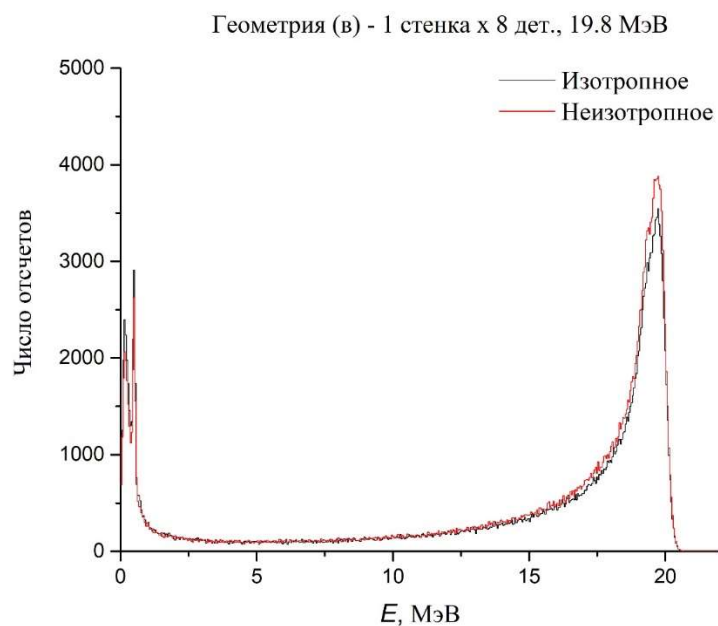


Рисунок Е5 – Расчетные спектры γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ в геометрии (в) – «1 стенка»:

черным цветом – для изотропного источника; красным цветом – для анизотропного источника

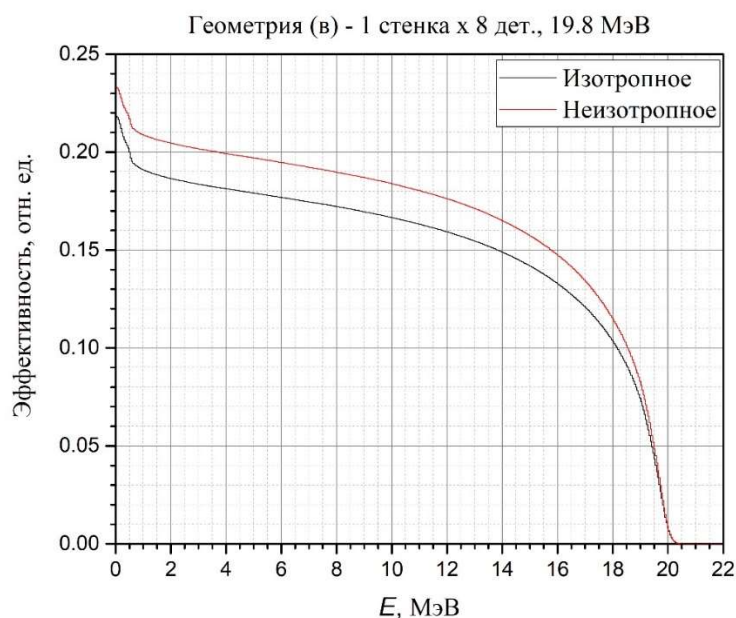


Рисунок Е6 – Сравнение кривых эффективности регистрации γ -квантов с энергиями 19.8 МэВ в геометрии (в) – «1 стенка»:

черным цветом – для изотропного источника; красным цветом – для анизотропного источника

Приложение Д

Сравнение кривых эффективностей для разных сборок

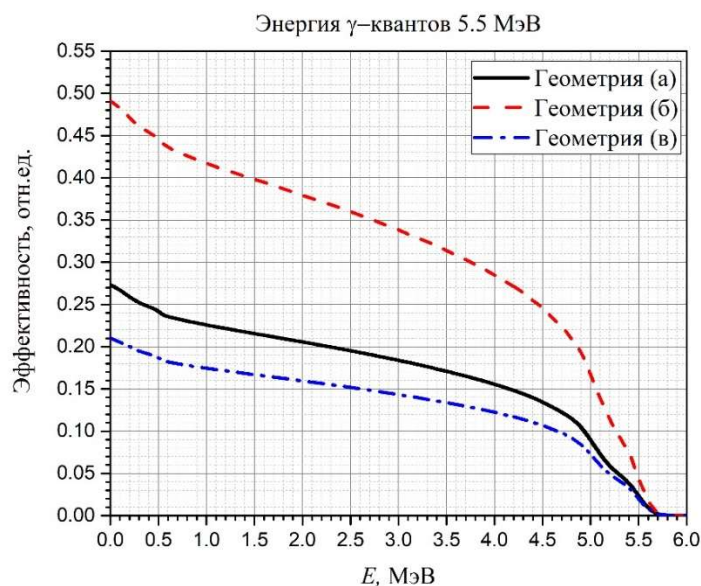


Рисунок Г1 – Кривые эффективности регистрации γ -квантов с $E_\gamma = 5.5$ МэВ: сплошная линия – геометрия (а); штрих – геометрия (б); штрихпунктир – геометрия(в)

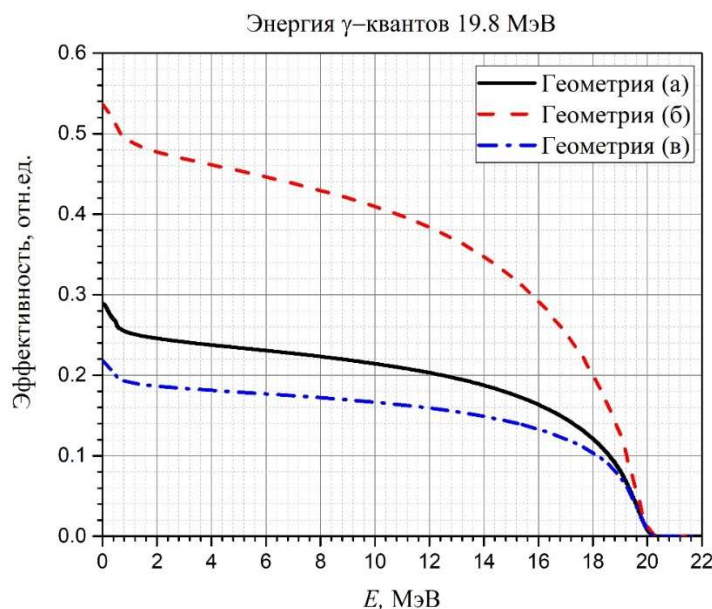


Рисунок Г2 – Кривые эффективности регистрации γ -квантов с $E_\gamma = 19.8$ МэВ: сплошная линия – геометрия (а); штрих – геометрия (б); штрихпунктир – геометрия(в)

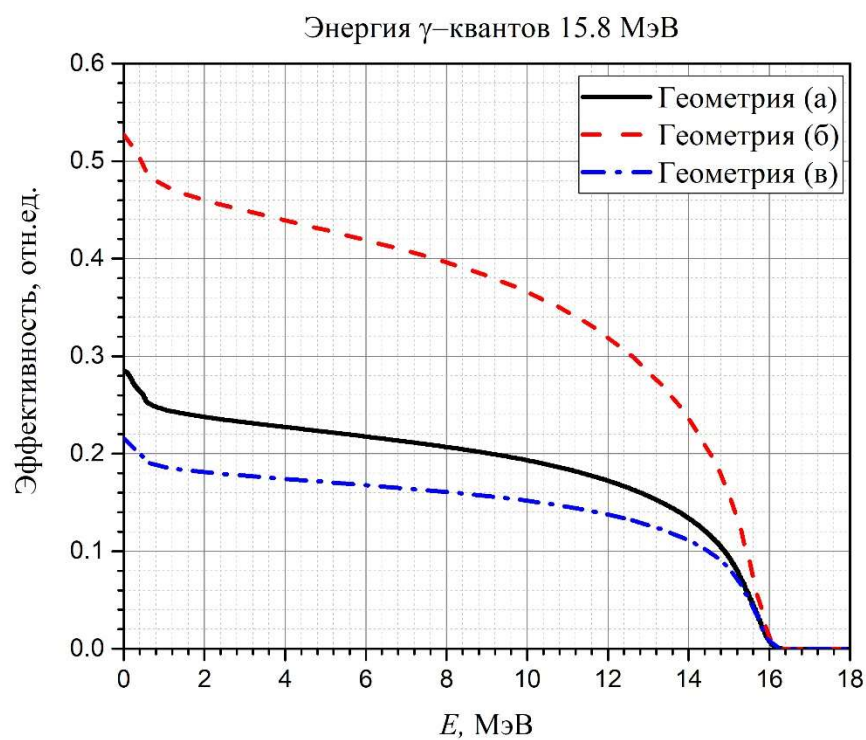


Рисунок ГЗ – Кривые эффективности регистрации γ -квантов с $E_\gamma = 15.8$ МэВ:
 сплошная линия – геометрия (а); штрих – геометрия (б); штрихпунктир –
 геометрия(в)

Приложение Е

Экспериментальные спектры для выделения пика γ -квантов с энергией 19.8 МэВ

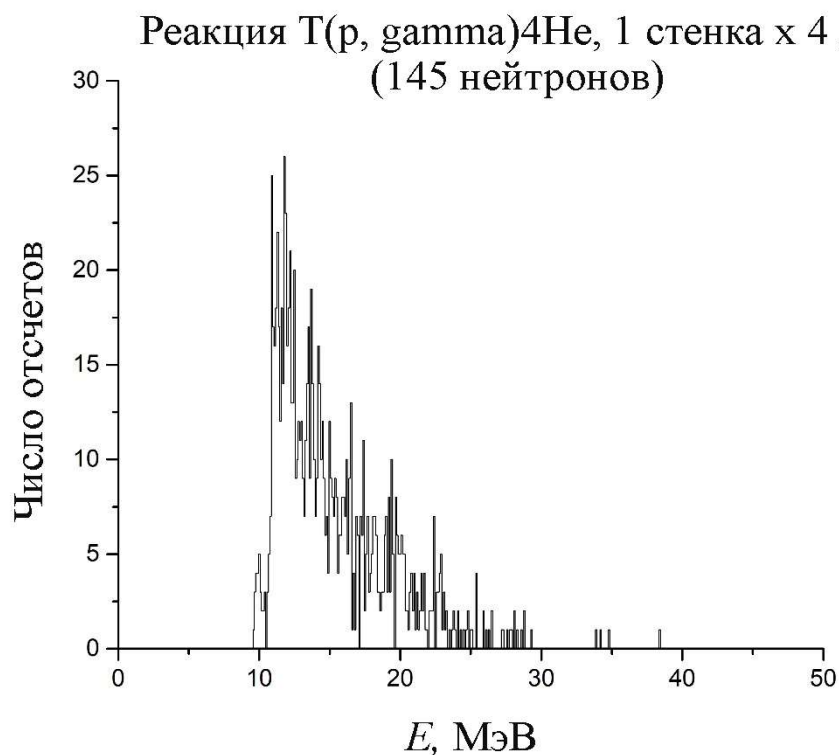


Рисунок Ж1 - Спектр γ -квантов, полученный при исследовании реакции $T(p, \gamma)^4\text{He}$ на 4 детекторах

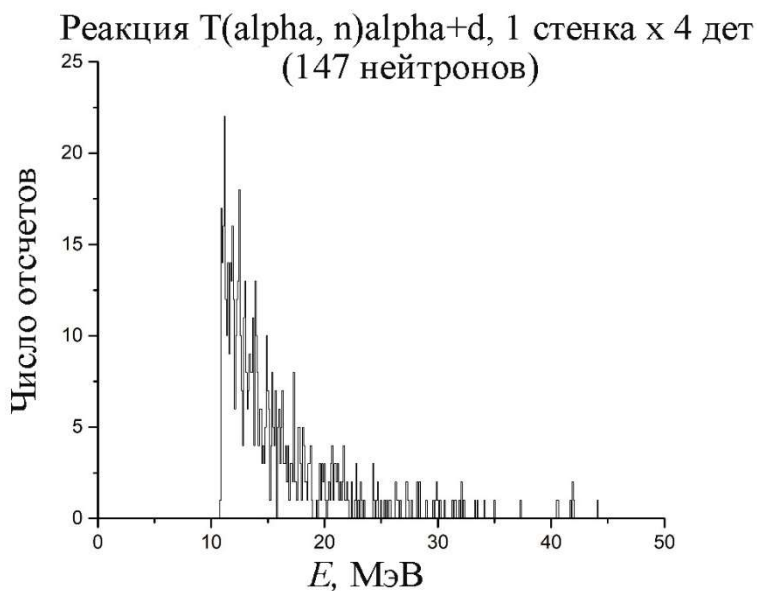


Рисунок Ж2 - Спектр γ -квантов, полученный при исследовании реакции $T(\alpha, n)\alpha d$ на 4 детекторах

Спектр вычитания

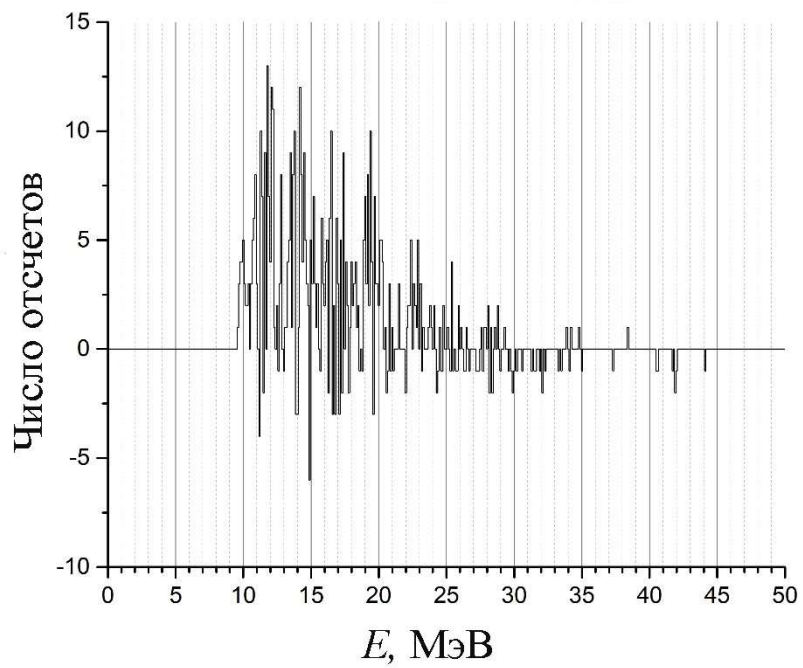


Рисунок ЖЗ – Спектр, полученный путем вычитания событий, зарегистрированных в реакции $T(\alpha, n)\alpha d$