

Школа _____ инженерная школа ядерных технологий _____
 Направление подготовки _____ 14.03.02 Ядерные физика и технологии _____
 Отделение школы _____ отделение ядерно-топливного цикла _____

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Моделирование электромагнитного калориметра в эксперименте NA64 CERN
УДК 539.1.074:536.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Б	Крамойкин Иван Алексеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ИШФВП	Шевелёв А. Э.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М. А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю. В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	способностью 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
ОПК(У)-3	владением основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	способностью использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-2	способностью проводить математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований
ПК(У)-3	готовностью к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов
ПК(У)-4	способностью использовать технические средства для измерения

	основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций
ПК(У)-5	готовностью к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
ПК(У)-6	способностью использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования приборов и установок
ПК(У)-7	способностью к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования
ПК(У)-8	готовностью к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	способностью к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	готовностью к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-12	способностью к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-13	способностью к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции
ПК(У)-14	готовностью к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем
ПК(У)-15	способностью к монтажу, наладке, настройке, регулировке, испытанию и сдаче в эксплуатацию оборудования и программных средств
ПК(У)-17	способностью 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
ПК(У)-18	готовностью разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-20	способностью к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

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 _____ отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Бычков П.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Б	Крамойкин Иван Алексеевич

Тема работы:

Моделирование электромагнитного калориметра эксперимента NA64 CERN	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	29.01.2021, 29-47/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– Описание геометрии калориметра в формате GDML, калибровочная статистика 2017 года.
--------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников по физическим процессам, определяющим развитие электромагнитного ливня в электромагнитных калориметрах. – Выбор методики калибровки электромагнитного калориметра эксперимента NA64 CERN. – Моделирование электромагнитного калориметра в Geant 4. – Изучение зависимости энергетического разрешения электромагнитного калориметра от энергии пучка. – Изучение энергетических утечек гамма-квантов. – Извлечение калибровочных коэффициентов на основе математической модели профиля ливня. – Калибровка электромагнитного калориметра. – Анализ полученных результатов. – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. – Социальная ответственность. – Заключение по работе.
---	--

Перечень графического материала	Презентация
--	-------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Передерин Ю. В.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М. А.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.02.2021
---	------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Дан Александрович	к.ф.-м.н.		
Старший преподаватель ИШФВП	Шевелев Алексей Эдуардович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Б	Крамойкин Иван Алексеевич		

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
 Уровень образования _____ бакалавриат
 Отделение школы _____ отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения _____ весенний семестр 2020 /2021 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы	08.06.2021
---	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
19.02.2021	Обзор литературных источников по физическим процессам, определяющим развитие электромагнитного ливня в электромагнитных калориметрах	10
25.02.2021	Выбор методики калибровки электромагнитного калориметра эксперимента NA64 CERN	10
20.03.2021	Моделирование электромагнитного калориметра в Geant 4	10
25.03.2021	Изучение зависимости энергетического разрешения электромагнитного калориметра от энергии пучка	5
24.04.2021	Изучение энергетических утечек гамма-квантов	5
06.05.2021	Извлечение калибровочных коэффициентов на основе математической модели профиля ливня	10
19.05.2021	Калибровка электромагнитного калориметра	10
21.05.2021	Анализ полученных результатов	10
25.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
25.05.2021	Социальная ответственность	10
25.05.2021	Заключение	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ИШФВП	Шевелев А. Э.	к.ф.-м.н.		

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
0А7Б	Крамойкин И. А.

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные 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>	...
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	...
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	...

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	...
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	...
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	...
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	...

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i>
2. <i>Сегментирование рынка</i>
3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
4. <i>Матрица SWOT</i>
5. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
6. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>
7. <i>Потенциальные риски</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов М. А.	Д.Э.Н.		27.02.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Б	Крамойкин И. А.		27.02.2021

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Б	Крамойкин Иван Алексеевич

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

Тема ВКР:

Атомная и электронная структуры системы палладий-серебро-водород в зависимости от концентрации водорода

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Атомная и электронная структуры системы палладий-серебро-водород
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1). – СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1). – СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643). – ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения. – ГОСТ Р 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность. – ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по
--	---

	<p>безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи.</p> <ul style="list-style-type: none"> – СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. – СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – ГОСТ 32548-2013 Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общие технические условия. – СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование. – ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума. – ГОСТ 12.4.026-76* Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные и знаки безопасности. – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов. – ГОСТ 12.1.006-84 Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения.
<p>2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Микроклимат – возможное отклонение в показателе микроклимата – Шум – возможное превышение уровня шума – Освещенность рабочей зоны – возможная отклонение от санитарных норм – Пожароопасность – возможное несоответствие нормам пожарной безопасности – Электробезопасность – возможное несоответствие нормам электробезопасности – Радиационная безопасность – возможное несоответствие нормам радиационной безопасности
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>Данное исследование не наносит вреда окружающей среде, но может быть нанесен вред в процессе создания вычислительного оборудования</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Возникновение пожара – Удар электрическим током - Падение

	с высоты собственного роста – Падение с лестницы Наиболее типичная ЧС: падение с высоты собственного роста
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.04.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю. В.	к.т.н.		22.04.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Б	Крамойкин И. А.		22.04.2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 95 с., 28 рис., 17 табл., 30 источников.

Ключевые слова: гетерогенный калориметр, калориметр типа шашлык, электромагнитный ливень, активная мишень, ионизирующее излучение.

Объектом исследования является развитие электромагнитного ливня в гетерогенном калориметре свинец-пластик.

Цель работы – построение модели электромагнитного ливня для реконструкции энерговыделения в калориметре ECAL.

В процессе исследования проводилось моделирование электромагнитного калориметра ECAL эксперимента NA64 в Geant 4 с целью оценки теоретического предела энергетического разрешения, оценки влияния энергетических утечек, а также извлечения калибровочных коэффициентов.

В результате исследования было выявлено, что в гетерогенном электромагнитном калориметре при заданной геометрии возникают поперечные утечки в основном через слои сцинтиллятора. Было установлено, что при расчете зависимости энергетического разрешения гетерогенного электромагнитного калориметра существенное влияние оказывают флуктуации неустранимых энергетических утечек, при моделировании функции отклика необходимо учитывать неоднородность высвечивания в веществе сцинтиллятора.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: ECAL представляет собой гетерогенный электромагнитный калориметр, состоящий из чередующихся пластин свинца толщиной 1,5 мм и пластин сцинтиллятора из полиметилметакрилата толщиной 1,55 мм. Моделирование проводилось в программном пакете Geant 4.

Степень внедрения: результаты исследований могут быть использованы при реконструкции физических событий эксперимента NA64 для определения реального энерговыделения в веществе калориметра.

Область применения: результаты исследований могут быть использованы для калибровки гетерогенных электромагнитных калориметров заданной геометрии в экспериментах физики высоких энергий.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке методики калибровки гетерогенного электромагнитного калориметра, что может быть использовано для уточнения существующих калибровок, или для осуществления новых.

В будущем планируется уточнить модель развития электромагнитного ливня за счёт параметризации учитывающей эффекты, связанные с пространственной анизотропией развития ливня, а также эффекты неоднородности энергетической конверсии.

Содержание

Введение	15
1 Физические процессы в калориметрах	17
2 Функция отклика калориметра	22
2.1 Абсолютный отклик и его отклонения	22
2.2 Флуктуации	24
2.3 Форма функции отклика	27
3 Методики калибровки электромагнитных калориметров	30
4 Параметризация электромагнитного ливня	35
5 Моделирование энергетического разрешения калориметра	37
6 Моделирование энергетических утечек	40
7 Аппроксимация профиля ливня	43
8 Извлечение калибровочных коэффициентов	46
9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	55
9.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	55
9.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	55
9.1.2 Анализ конкурентных технических решений	55
9.1.3 <i>SWOT</i> -анализ	57
9.2 Планирование научно-исследовательских работ	59
9.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	59
9.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	61
9.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	62
9.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	65

9.3.1	Расчет затрат на оборудование для научно-экспериментальных работ	66
9.3.2	Основная заработная плата исполнителей темы	66
9.3.3	Отчисления во снбюджетные фонды (страховые отчисления)	69
9.3.4	Накладные расходы	69
9.3.5	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	70
9.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	71
10	Социальная ответственность	74
10.1	Оценка вредных и опасных факторов	74
10.1.1	Микроклимат	76
10.1.2	Шум	79
10.1.3	Освещение	80
10.1.4	Электромагнитные поля	82
10.1.5	Пожароопасность	83
10.1.6	Электробезопасность	85
10.1.7	Радиационная безопасность	86
10.2	Аварийные ситуации	87
10.3	Выводы по главе	90
	Заключение	91
	Литература	92

Введение

В 30-х годах XX века наблюдения за движением материи во Вселенной стали указывать на наличие во Вселенной значительной массы, недоступной для прямой регистрации и проявляющей себя только в гравитационном взаимодействии [1]. Эта скрытая масса была названа тёмной материей. Однако, за прошедшее время темную материю не удалось зарегистрировать непосредственно, и до сих пор она остается одной из важнейших загадок современных космологии и астрофизики.

Есть основания полагать [2], что поиски темной материи можно проводить не только методами астрофизики, но и на ускорителях частиц.. Предполагается, что при столкновении высокоэнергетических частиц между собой или с веществом мишени могут образовываться частицы тёмной материи. Такие эксперименты обычно подразумевают использование калориметров для регистрации полной энергии в различных реакциях (герметичная постройка эксперимента со сбросом пучка – *beam dump*) [3].

Изначально калориметры производились как довольно грубые, но дешевые инструменты для специализированного применения. Например, для детектирования нейтринных взаимодействий. В современных коллайдерных экспериментах они являются одними из ключевых элементов в телескопах детекторов. Они подходят для множества задач, начиная от отбора событий и заканчивая точными измерениями четырехвекторов отдельных частиц и сгустков частиц и получением информации об энерговыделении в результате различных событий.

Вклад калориметрической информации в анализ данных заключается, в основном, в идентификации частиц и измерении энергии частиц, порождающих электромагнитные ливни. Ожидается, что значение адронной калориметрии будет расти с дальнейшим ростом энергий сталкивающихся частиц.

NA64 – это эксперимент с фиксированной мишенью, на протонном суперсинхротроне (*SPS*), расположенном в Европейском центре ядерных исследований (*CERN*), и направленный на поиск экзотических легких бозонов. Ключевым детектором в постройке эксперимента является

гетерогенный электромагнитный калориметр *ECAL*. Для получения достоверных результатов необходима тщательная калибровка калориметра.

Одним из наиболее результативных методов калибровки является калибровка, основанная на компьютерном моделировании. Целью настоящей работы является построение модели электромагнитного ливня для реконструкции энерговыделения в калориметре *ECAL*.

Задачи:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- обзор литературы с целью определения наиболее подходящей параметризации электромагнитного ливня для известных конструкции калориметра и диапазона энергий;
- получение профиля электромагнитного ливня на основе МК-модели, достижение согласия результатов моделирования с предсказаниями параметризации;
- определение энергетического разрешения электромагнитного калориметра.

1 Физические процессы в калориметрах

Существует несколько процессов, играющих роль в развитии электромагнитного ливня. Электроны и позитроны теряют энергию на ионизацию и излучение. Первый процесс преобладает при низких энергиях, второй – при высоких. Критическая энергия, при которой роль обоих процессов одинакова в первом приближении обратно пропорциональна зарядовому числу вещества поглотителя [4]:

$$\epsilon_c = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1,24} \quad (1)$$

Фотоны взаимодействуют с веществом преимущественно посредством фотоэффекта, Комптоновского рассеяния и эффекта образования электро-позитронных пар. Фотоэффект преобладает при низких энергиях, а образование пар при высоких. Соответствующие сечения зависят от Z . Например, сечение фотоэффекта пропорционально Z^5 и E^{-3} , в то время как сечение образования пар постепенно возрастает с ростом Z и E , асимптотически приближаясь к определенному значению при значениях энергии порядка 1 ГэВ. Угловое распределение более или менее изотропно для фото- и комптоновских электронов, но имеет строго преобладающее направление для электронов и позитронов, рожденных в результате образования пар.

Начиная с энергий от 1 ГэВ и выше, электроны и фотоны образуют электромагнитный ливень в веществе, в которое они проникают. Электроны теряют свою энергию преимущественно на излучение, фотоны с наибольшей энергией, рожденные в этом процессе, конвертируются в электрон-позитронные пары, которые также излучают фотоны и т. д. Число частиц, образующихся в развивающемся ливне достигает максимума на определенной глубине внутри поглотителя, после чего постепенно убывает. Глубина, на которой ливень достигает своего максимума, логарифмически возрастает с увеличением энергии иницирующей ливень частицы.

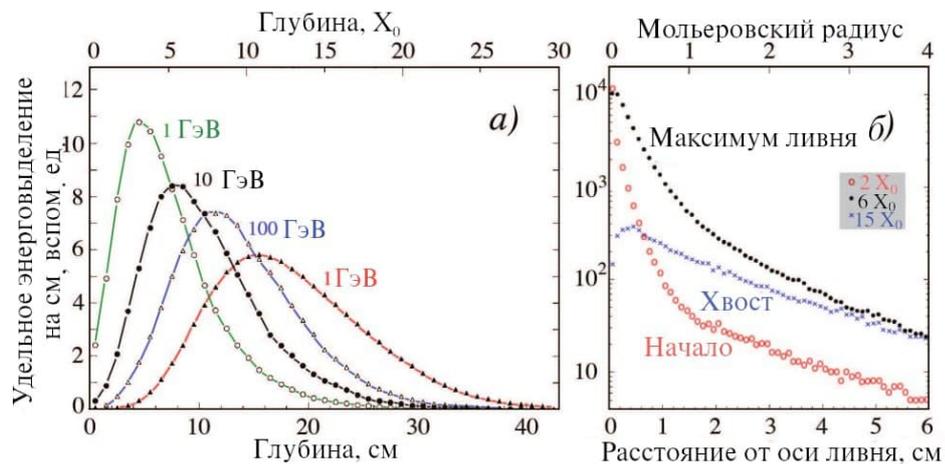


Рисунок 1 – Энерговывделение как функция глубины для электромагнитных ливней, образованных 1, 10, 100 ГэВ и 1 ТэВ электроном в медном поглотителе (а). Радиальное распределение энергии, оставленной 10 ГэВ электроном в меди на различных глубинах (б). Результат симуляции в программе *EGS4* [4]

Поперечное развитие ливня обусловлено множественным рассеянием электронов и позитронов, а так же изотропным и несоосным с ливнем характером рождения фотонов и позитронов.

Первый процесс преобладает на ранних стадиях развития ливня, а второй после того, как ливень преодолевает максимум. Влияние обоих процессов хорошо демонстрируется рис. 1(б), на котором изображена радиальная плотность энергии ливня, порожденного электроном в меди, на трех различных глубинах внутри калориметра.

Развитие ливня может быть описано более или менее независимо от материала поглотителя в терминах радиационной длины X_0 (в продольном направлении) и Мольеровского радиуса ρ_M (в поперечном направлении). Радиационная длина различается для фотонов и электронов достаточно существенно. Ливни, инициированные высокоэнергетичным электроном или же фотоном, имеют существенные отличия. Попадая в материал, высокоэнергетичные электроны начинают излучать немедленно. На их пути, через первые несколько миллиметров материала, они могут испускать тысячи фотонов тормозного излучения. С другой стороны, высокоэнергетичный фотон может как провзаимодействовать с веществом на такой же длине, так и не провзаимодействовать. В последнем случае он

не потеряет энергии совсем, а в случае взаимодействия, может потерять даже больше, чем электрон в таком же количестве материала. Такая разница иллюстрируется на рис. 2. В одинаковом количестве материала электроны теряют большую долю своей энергии, чем фотоны, но разброс энергетических потерь у фотонов больше.

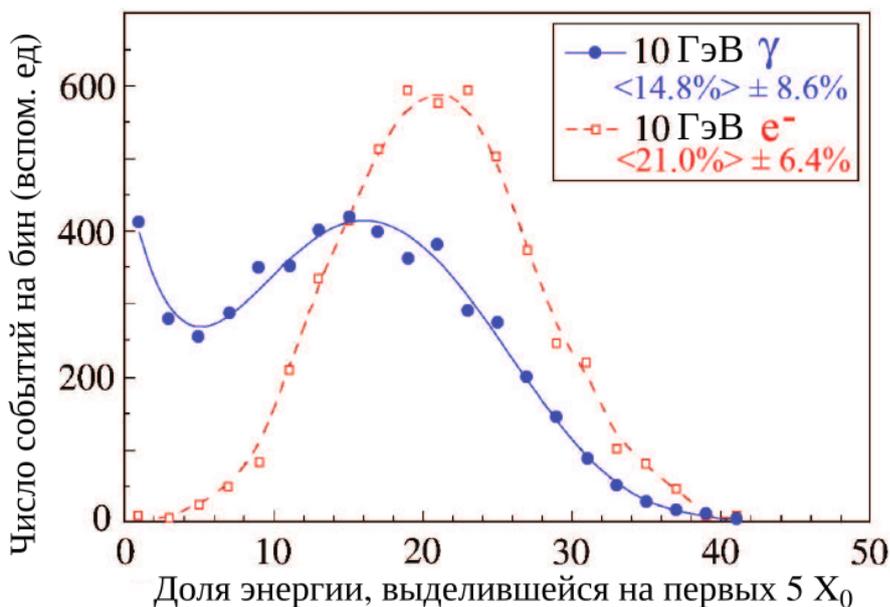


Рисунок 2 – Распределение доли энергии, оставленной при прохождении пяти радиационных длин электроном и фотоном с энергиями 10 ГэВ [4]

В первом приближении профиль электромагнитного ливня в основном определяется значениями X_0 и ρ_M , но такое приближение неидеально, что демонстрируется на рис. 3, где показано энерговыделение на единице радиационной длины. Такое отличие проще понять посредством того факта, что количество вторичных частиц после максимума ливня начинает уменьшаться, и это снижение медленнее в материалах с высоким Z . Например, высокоэнергетичный электрон порождает в свинце в три раза больше позитронов, чем в алюминии. В результате нужно больше радиационных длин свинца, чем алюминия, чтобы уместить в себе 99 % ливня. К тому же, максимум ливня располагается в материале с высокими Z на большей глубине.

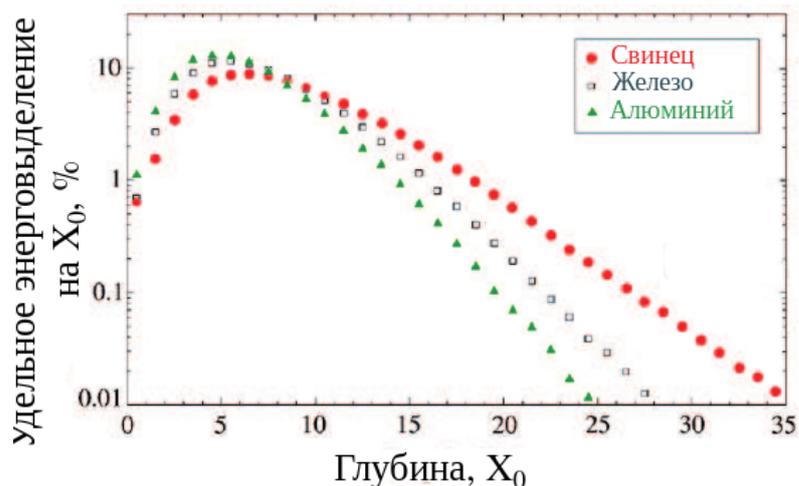


Рисунок 3 – Продольные профили электромагнитных ливней, образованных электроном с энергией 10 ГэВ в алюминии, железе и свинце [4]

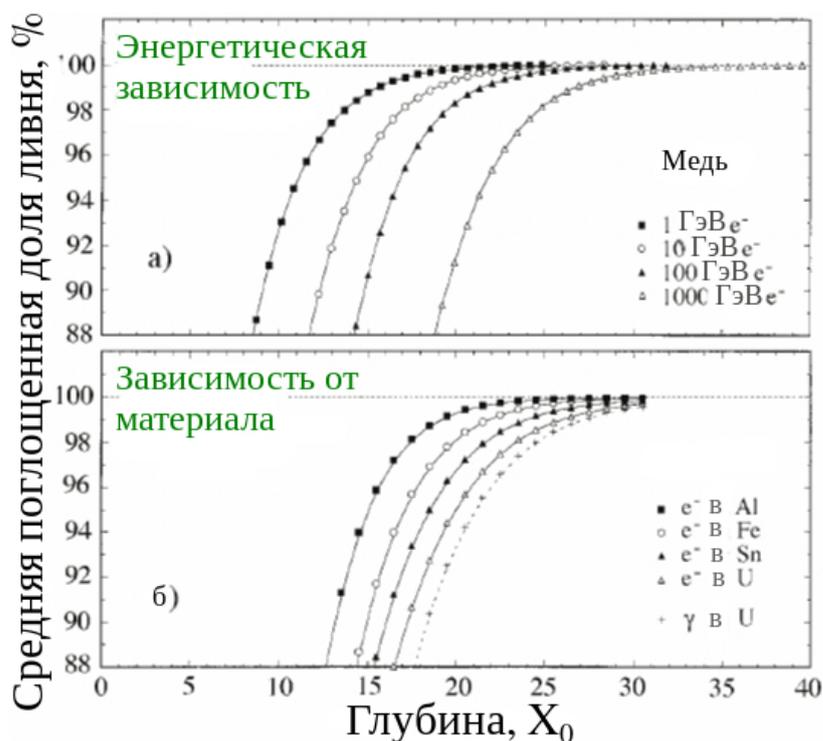


Рисунок 4 – Средняя доля энергии, выделившейся в блоке материала в результате прохождения его частицей. Показаны результаты для ливней, образованных электронами различных энергий в медном поглотителе (а) и результаты для ливней, образованных электроном с энергией 100 ГэВ в различных поглотителях (б). Результат симуляции в программе *EGS4* [4]

Зависимость толщины калориметра, необходимой для того, чтобы

вместить электромагнитный ливень, образованный электроном, для различных материалов представлена на рис. 4(б). При поглощении 99 % электромагнитного ливня разница между материалом с высоким Z и материалом с низким Z может достигать десяти X_0 . И по причинам, описанным выше, нужно еще больше материала, чтобы поглотить ливень, образованный фотоном. Зависимость доли поглощенной энергии от толщины калориметра изображена на рис. 4(а). Для поперечной локализации ливня энергетическая зависимость отсутствует, а различия в материале не такие значительные, как для продольного. Достаточно длинный цилиндр таким образом поглотит одинаковую долю энергии от 1 ГэВ ливня и от 1 ТэВ ливня.

Нарушения пропорциональности, рассмотренные на рис. 3 и 4, вызваны явлениями, которые происходят при энергиях ниже критической. Например, в свинце более 40 % энергии ливня оставляется в веществе частицами с энергиями ниже 1 МэВ, в то время как критическая энергия имеет значение примерно 7 МэВ. Только четверть энергии оказывается внесена позитронами, остальное приносят электроны. Эти факты получены в результате Монте-Карло симуляции развития ливня, и показывают, что комптоновское рассеяние и явление образования пар в основном ответственны за формирование профиля ливня. Оба процесса преобладают на энергиях ниже критической, а значит, недостаточно точно описываются терминами радиационной длины X_0 и Мольеровского радиуса ρ_M .

2 Функция отклика калориметра

2.1 Абсолютный отклик и его отклонения

Определим отклик калориметра как средний сигнал калориметра на единицу выделенной энергии. Таким образом, отклик может быть выражен в терминах числа фотоэлектронов на один ГэВ, в пикокулонах на МэВ и т.д.

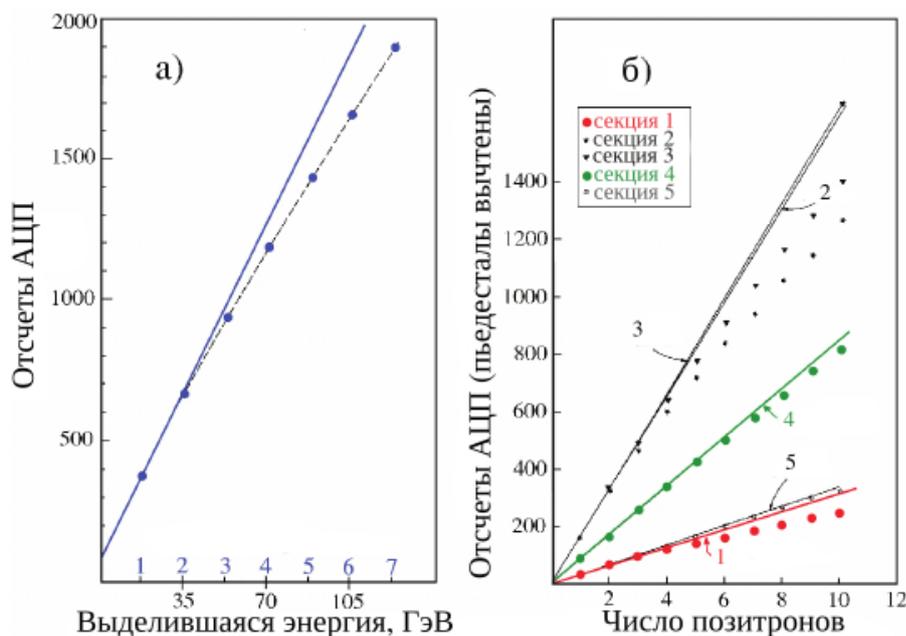


Рисунок 5 – Средний сигнал гетерогенного калориметра с проволочными камерами, работающими в режиме «насыщенной лавины», на электромагнитный ливень как функция выделившейся энергии (а), сигнал для каждой из пяти секций (б) [4]

В общем случае электромагнитные калориметры линейны только тогда, когда вся энергия пучка выделяется в результате процессов, которые могут производить сигналы (возбуждение или ионизация в слое поглотителя). Нелинейность обычно свидетельствует об инструментальных проблемах, таких как насыщение сигнала и ливневые утечки. На рис. 5 показан отклик нелинейного калориметра. В этом детекторе проволочные камеры, использующиеся для детектирования прохождения частицы из ливня, работают в режиме «насыщенной лавины», это значит, что камеры не различают прохождение одной частицы и n частиц. С повышением энергии ливня или плотности частиц в ливне эффект насыщения понижает

отклик. Рис. 5(б), на котором представлена зависимость сигнала сегментированного на пять секций калориметра от числа образовавшихся в каждой секции позитронов, показывает, что не столько выделившаяся энергия, сколько плотность образовавшихся частиц ответственна за подобные эффекты, так как влияние эффектов наиболее заметно на ранней стадии развития ливня (секция 1), при которой ливень еще сильно сколлапсирован. Описанные эффекты можно избежать, используя камеры в пропорциональном режиме.

По своему устройству калориметры подразделяются на два класса:

1) Гомогенные калориметры, в которых поглотитель является также активным материалом, производящим сигнал.

2) Гетерогенные калориметры, в которых каждый материал выполняет свою функцию.

В инструментах, относящихся ко второму классу, только доля энергии ливня выделяется в активном материале. Эта «сэмплирующая» доля обычно определяется на основании сигнала от минимально ионизирующей частицы (*mip*). *Mip* соответствует частице, удельные ионизирующие потери которой в веществах поглотителя и активного материала будут наименьшими. Например, в калориметре *D0*, который состоит из пластин из U^{238} , разделенных промежутками в 4,6 мм, заполненными жидким аргоном, сэмплирующая доля для *mip* составляет 13,7%. Однако для электромагнитных ливней сэмплирующая доля энергии составляет приблизительно 8,2%.

Причиной такого различия снова является тот факт, что основной вклад в сигнал от электромагнитного ливня вносят очень мягкие частицы. Гамма-кванты с энергиями ниже 1 МэВ чрезвычайно неэффективно регистрируются в детекторах этого класса, потому что наиболее вероятное взаимодействие при таких энергиях это фотоэффект. Сечение фотоэффекта пропорционально Z^5 , поэтому практически все взаимодействия мягких гамма-квантов происходят в слоях поглотителя, и вклад в сигнал можно ожидать только если взаимодействие произошло очень близко к границе поглотителя с активным слоем (тогда фотоэлектрон, чей пробег меньше 1 мм, может, выбравшись из поглотителя, произвести сигнал в жидком

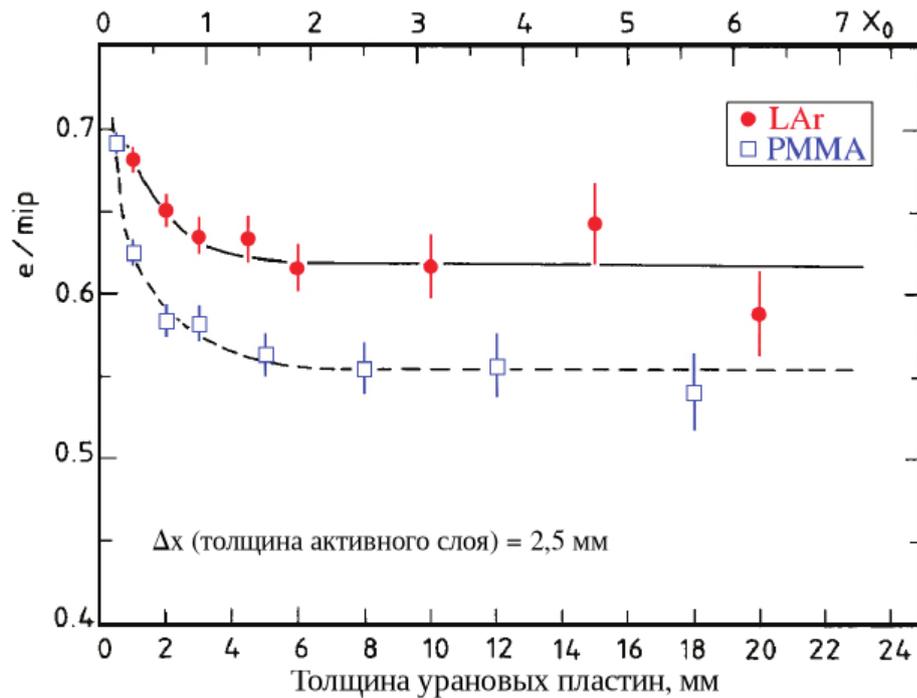


Рисунок 6 – Отношение e/mip как функция толщины слоёв поглотителей для calorиметров уран/оргстекло и уран/жидкий аргон.

Результат симуляции в программе *EGS4* [4]

аргоне). По причине ключевой роли фотоэффекта, его влияние на отношение e/mip зависит от значений Z пассивного и активного материалов (e/mip наименьшее для поглотителей с высоким Z и активных материалов с малыми Z) и от толщины слоёв поглотителя (рис. 6). Если поглотитель сделать достаточно тонким, то e/mip становится практически равным 1.

2.2 Флуктуации

Так как принцип работы calorиметров основан на статистических процессах, точность calorиметрических измерений определена и ограничена флуктуациями. На энергетическое разрешение электромагнитного calorиметра влияет несколько флуктуационных процессов:

- квантовые флуктуации сигнала, например фотоэлектронная статистика;
- флуктуации ливневых утечек;
- флуктуации, обусловленные инструментальными эффектами,

такими как электронные шумы, ослабление светового потока и структурные неоднородности;

— флуктуации сэмплирования.

Последний процесс характерен только для гетерогенных калориметров. В хорошо спроектированных калориметрах этот вид флуктуаций преобладает над остальными. В отличие от других флуктуационных процессов, флуктуации сэмплирования обусловлены правилами статистики Пуассона. Таким образом, их вклад в энергетическое и позиционное разрешение описывается слагаемым, который пропорционален $1/\sqrt{E} : \sigma/E \sim E^{-1/2}$.

Флуктуации сэмплирования обусловлены сэмплирующей долей (или же относительным количеством активного материала) и частотой сэмплирования (толщиной слоёв). В электромагнитных калориметрах с не газовым активным слоем они хорошо описываются следующей формулой[4]:

$$\frac{\sigma}{E} = 2,7 \% \sqrt{d/f_{\text{sampl}}} E^{-1/2}, \quad (2)$$

в которой d — это толщина активного слоя (в мм), а f_{sampl} — это сэмплирующая доля для tip . Например, рассчитанная по формуле (2) составляющая энергетического разрешения для свинцово-сцинтилляционного калориметра *KLOE* [5], соответствующая флуктуациям сэмплирования, равна $6,9 \%/\sqrt{E}$, что хорошо соответствует экспериментально найденному значению разрешения $5,7 \%/\sqrt{E}$.

Среди калориметров, разрешение которых определяется в основном квантовыми флуктуациями сигналов, можно упомянуть германиевые детекторы, используемые для ядерной γ -спектрометрии, и калориметры с кварцевым волокном, такие как *CMS* или *HF*. Количество энергии, необходимой для образования сигнала, в этих двух примерах различается на девять порядков по величине. В то время как достаточно 1 эВ для образования электронно-дырочной пары в германиевом детекторе, светосбор в кварцевом калориметре обычно около 1 ГэВ на фотоэлектрон. Таким образом квантовые флуктуации сигнала ограничивают разрешение германиевых калориметров до величины 0,1 % на МэВ, а кварцевых до

10 % на ГэВ.

Влияние флуктуаций ливневых утечек на разрешение электромагнитного калориметра демонстрируется на рис. 7. Эти флуктуации имеют не Пуассоновский характер и поэтому, их вклад в разрешение не пропорционален $E^{-1/2}$. Оказывается также, что для заданного положения ливня, влияние продольных утечек значительно, чем поперечных. Эти отличия объясняются различиями в числах различных частиц, ответственных за утечки. Например, флуктуации в точке начала порожденного фотоном ливня, являются флуктуациями утечек, за которые ответственна только единственная частица – инициирующий фотон. Боковые утечки – это коллективный феномен, в который вносят вклад множество частиц.

В отличие от продольных и поперечных утечек, третий тип утечек, альbedo, или же обратные утечки через тот торец детектора, в который попадает инициирующая частица, не может быть уменьшен посредством изменения конструкции детектора. К счастью, эти утечки крайне невелики во всем диапазоне энергий, кроме очень малых значений. Результаты, показанные на рис. 7, получены путем Монте-Карло моделирования, но они подтверждаются многими экспериментами.

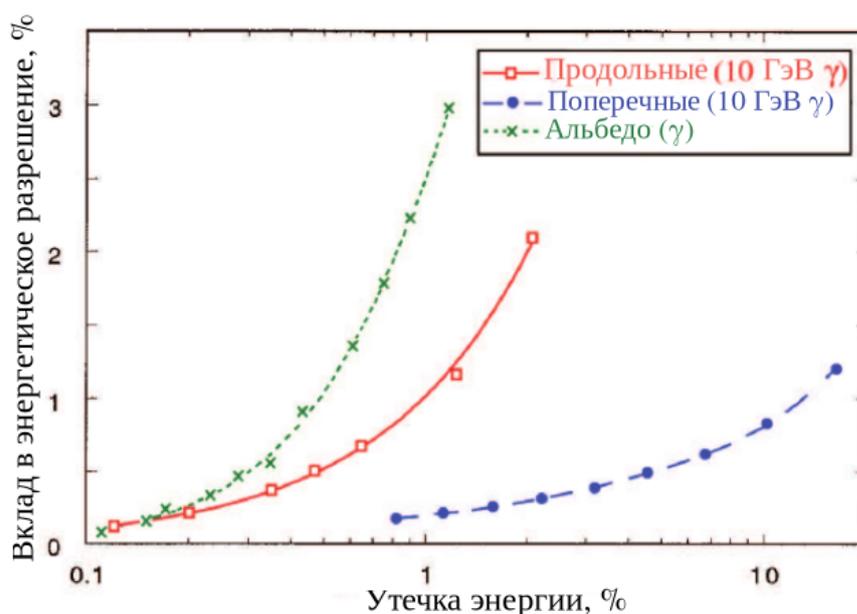


Рисунок 7 – Сравнение эффектов, вызванных ливневыми утечками различного рода. Результат симуляции в программе *EGS4* [4]

На практике разрешение конкретного калориметра определяется различными видами флуктуаций, каждый из которых имеет характерную энергетическую зависимость. Обычно эти эффекты некоррелированы, значит могут учитываться в виде отдельных слагаемых. По причине различных зависимостей от энергии общее разрешение калориметра при различных энергиях может быть обусловлено различными флуктуационными эффектами.

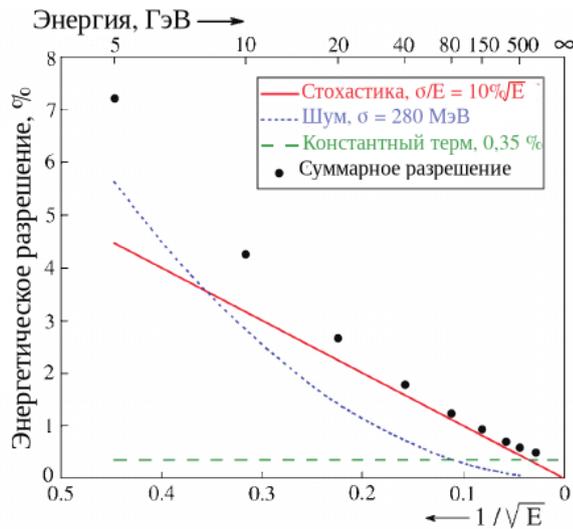


Рисунок 8 – Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра эксперимента *ATLAS* [6]

Это иллюстрируется рис. 8, на котором изображена зависимость различных слагаемых, входящих в выражение энергетического разрешения, от энергии для электромагнитного калориметра эксперимента *ATLAS*. Для энергий ниже 10 ГэВ преобладающим фактором является электронный шум, между 10 и 100 ГэВ – флуктуации сэмплирования и другие стохастические процессы, при энергиях выше 100 ГэВ независимые от энергии эффекты влияют на энергетическое разрешение.

2.3 Форма функции отклика

Не все виды флуктуаций, увеличивающие отклонения отклика, являются симметричными относительно среднего значения. Ниже перечислены примеры эффектов, приводящих к несимметричным функциям отклика:

— Если сигнал сформирован очень маленьким числом частиц (например фотоэлектронами), то распределение Пуассона становится ассиметричным. Эффекты такого рода наблюдаются в сигналах калориметров с кварцевым оптическим волокном (рис. 9).

— Эффекты ливневых утечек приводят к «хвостам» в распределениях сигналов. Обычно, такие хвосты возникают в распределении сигналов с низкоэнергетической стороны, потому что энергия покидает активный объем детектора. Однако существуют примеры детекторов, в которых утечки приводят к усилению сигнала. Такое явление наблюдается в сцинтилляционных калориметрах, в которых сцинтилляции улавливаются кремниевыми диодами. Попадание в такой диод выбравшегося из детектора электрона может привести к тому, что величина сигнала окажется большей, чем от сцинтилляционного фотона (рис. 10,а).

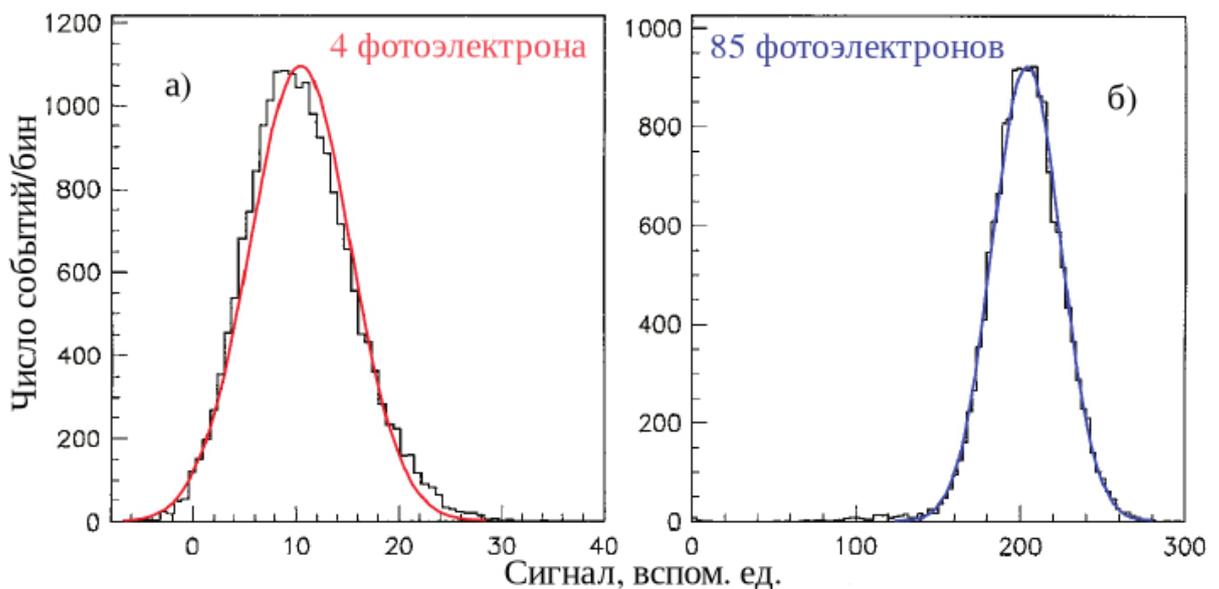


Рисунок 9 – Распределение сигналов для электромагнитных ливней, образованных электронами с энергией 10 ГэВ (а) и 200 ГэВ (б), в калориметре эксперимента *CMS* с кварцевыми оптическими волокнами [7]

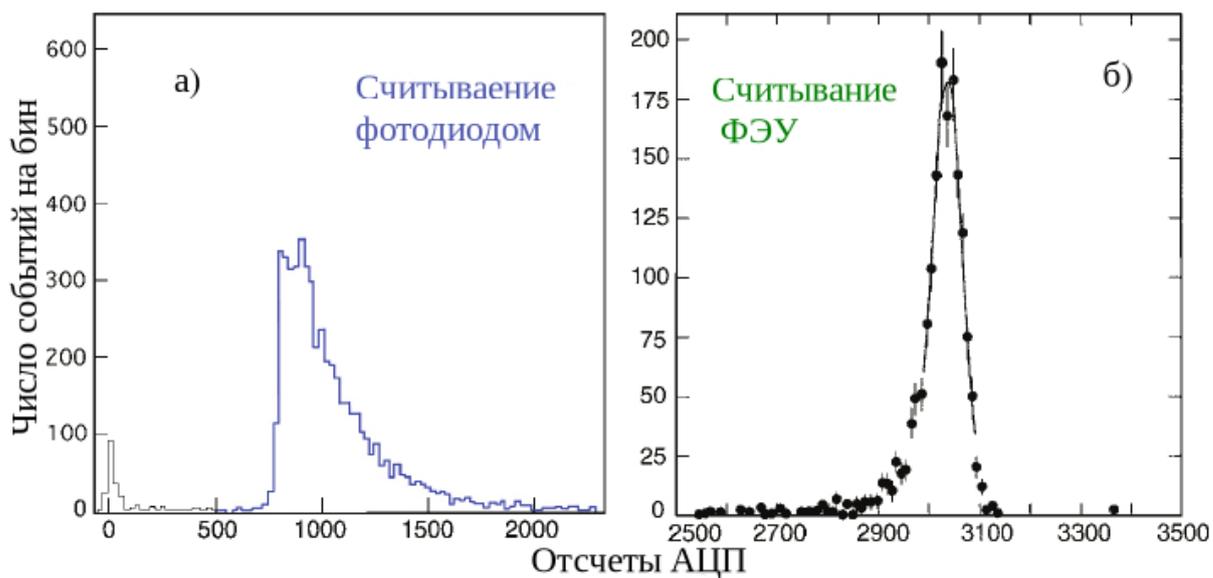


Рисунок 10 – Распределения сигналов от высокоэнергетического электрона, образующего электромагнитный ливень в PbWO_4 кристальном калориметре. Для снятия сигнала используется кремниевый фотодиод (а) и ФЭУ (б) [8]

3 Методики калибровки электромагнитных калориметров

Калибровка, или же установление отношения между выделившейся энергией и сигналом калориметра является, возможно, наиболее важным аспектом работы. Во втором разделе было упомянуто, что устройство калориметра определяется процессами, происходящими на последних стадиях развития ливня. Эту особенность нужно учитывать при калибровке продольно сегментированных устройств.

В электромагнитном ливне, развивающемся внутри гетерогенного калориметра, сэмплирующая доля для мягких гамма-квантов отличается от аналогичной для mip . Поэтому общая сэмплирующая доля является функцией глубины или возраста ливня. Это иллюстрируется на рис. 11. Этот эффект зависит не только от Z активного и пассивного материалов, но также и от энергии ливня.

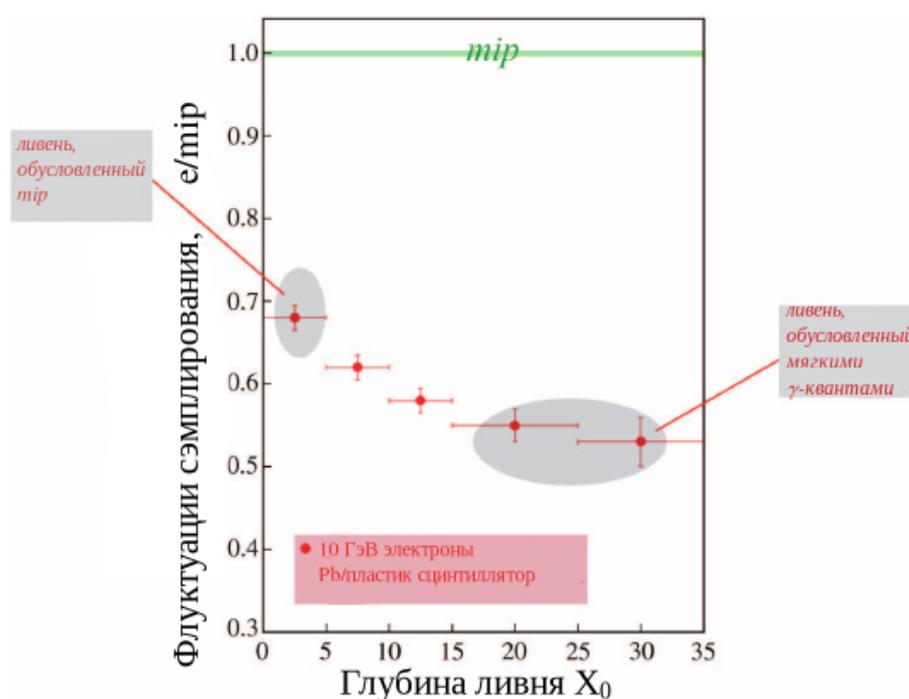


Рисунок 11 – Отношение e/mip как функция глубины ливня, образованного электроном с энергией 1 ГэВ в гетерогенных электромагнитных калориметрах различных конфигураций. Результат симуляции в программе *EGS4* [4]

Чем ниже энергия ливня, тем раньше преобладающими станут мягкие

частицы Комптоновского рассеяния и фотоэффекта. Если калориметр продольно сегментирован, то отношение между выделившейся энергией и результирующим сигналом калориметра будет различным для разных сегментов. Как результат, энергия, выделившаяся в различных сегментах, систематически недооценивается (или переоценивается), причем величина ошибки зависит от энергии инициирующей ливень частицы. Это демонстрируется рис. 12, на котором изображен размер просчетов для двух секций, составляющих калориметр *HELIOS* [9]. Энергия в первой секции (глубиной $6,6 X_0$) систематически переоценивается, энергия во второй секции систематически недооценивается.

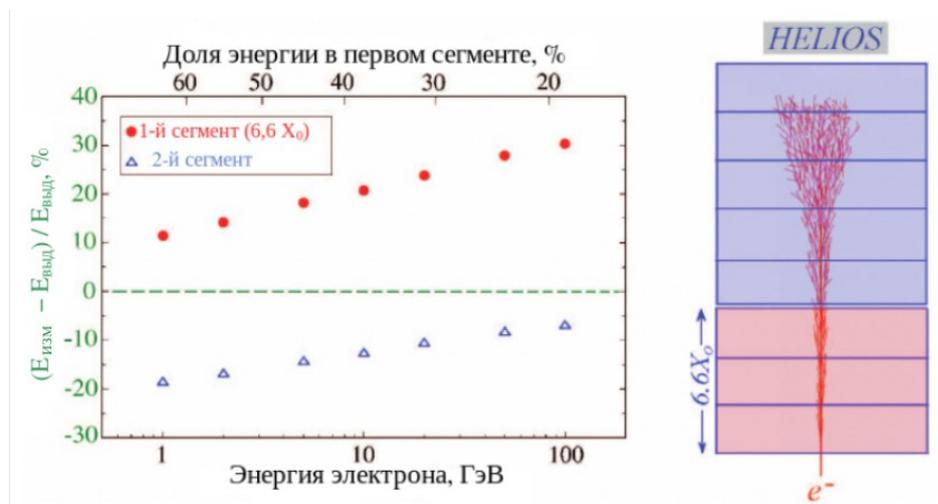


Рисунок 12 – Ошибка при измерении энергии, выделившейся в конкретной секции продольно сегментированного калориметра *HELIOS*, как функция энергии электронов, образующих ливень (нижняя ось), или доли энергии, выделившейся в первом сегменте (верхняя ось) [4]

На практике в подобных случаях принято определять калибровочные константы для этих двух секций и возникает вопрос о том, как это сделать. Практически все используемые методы не приводят к должному результату. Например, для калибровки упомянутого выше калориметра *HELIOS*, используется метод, в котором калибровочные константы выбираются так, чтобы минимизировать ширину сигнала, соответствующего следующей формуле [4]:

$$Q = \sum_{j=1}^N \left[E - A \sum_{i=1}^n S_{ij}^A - B \sum_{i=1}^n S_{ij}^B \right]^2, \quad (3)$$

где A – калибровочная константа для первой секции, B – калибровочная константа для второй секции.

Однако выяснилось, что значения констант A и B , а особенно их отношение зависит от энергии электронов, которые использовались для калибровки детектора. Эта зависимость показана на рис. 12,а. В частности было установлено, что эти константы отличаются от единицы, то есть обе секции недокалиброваны, относительно мюонов, которые сэмпляются обеими секциями совершенно одинаково. Установлено, что такой метод калибровки приводит к следующим нежелательным последствиям:

- зависимость калибровочных констант от энергии;
- нелинейность электромагнитного отклика;
- систематические отличия в откликах электронов, гамма-квантов и пионов.

Это приводит, практически во всех случаях, к зависимости реконструируемой энергии от точки начала ливня и к систематическим просчетам при измерении энергии джетов. Далее приведены несколько методов, которые широко используются на практике для того, чтобы снизить влияние подобных нежелательных эффектов.

Существует множество экспериментов, в которых продольная сегментация является причиной проблем, возникающих при калибровке. В качестве примера можно упомянуть эксперимент *AMS* [10]. Его свинцово-сцинтилляционный калориметр с оптическими волокнами по длине разделен на 18 сегментов, каждый толщиной примерно $1 X_0$. Каждый из этих сегментов калибруется на *tip* и энергетический эквивалент прохождения одного *tip* через сегмент был установлен равным 11,7 МэВ. Как бы то ни было, полной длины калориметра ($17 X_0$) недостаточно для того, чтобы полностью поглотить энергию ливня, что демонстрируется на рис. 13(а). Как результат, общий сигнал калориметра не пропорционален энергии пучка. Чем больше энергия пучка, тем больше утечки (рис. 13,б). Путем интегрирования функции, аппроксимирующей профиль пучка, от

нуля до бесконечности, оказывается возможным восстановить лишь часть потерянной энергии.

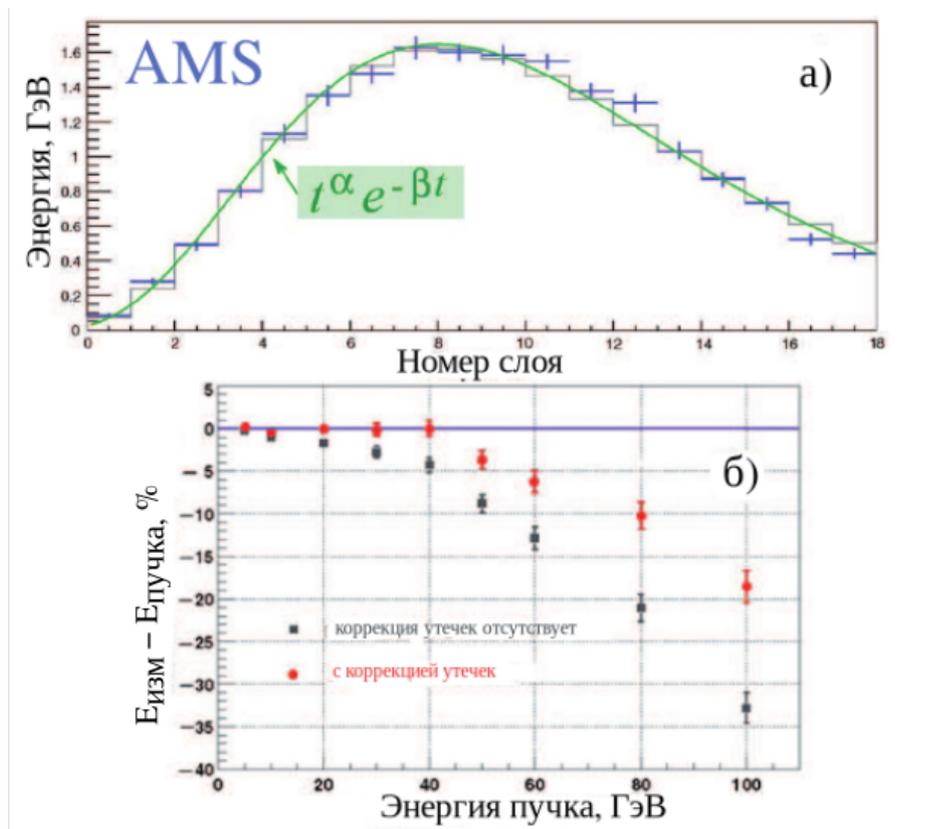


Рисунок 13 – Средние сигналы, вызванные электроном с энергией 100 ГэВ в 18 продольных секциях калориметра эксперимента *AMS* (а). Усредненная разность между измеренной энергией и энергией пучка до и после поправок, учитывающих утечки (б)

Это объясняется тем, что сигналы, снятые с участков за максимумом ливня соответствуют значительно большей энергии, чем сигналы из сегментов, в которых происходит раннее развитие ливня. При использовании одинаковых коэффициентов преобразования сигнала в энергию для всех участков модуля, поперечные утечки систематически будут недооцениваться. Таким образом, реконструированная энергия ливня систематически оказывается слишком маленькой, особенно, если доля утечек велика.

Коллаборацией эксперимента *ATLAS* был разработан подход, который на практике приводит к достаточно хорошим результатам. В этом эксперименте используется калориметр из свинца и жидкого аргона,

состоящий из трех продольных сегментов (толщиной $4,3 X_0$, $16 X_0$ и $2 X_0$ соответственно). Сэмплирующая доля энерговыделения в этом детекторе значительно понижается с ростом длины, несмотря на его однородную структуру. Калибровочные коэффициенты были найдены на основании тщательной Монте-Карло симуляции таким образом, чтобы достичь одновременно хорошего разрешения и линейности сигнала [11]. Реконструкция энергии по измеренному сигналу производилась на основании формулы, содержащей по крайней мере 4 параметра, которые нелинейно зависели от энергии электронов пучка. Благодаря этой формуле авторы достигли линейности в интервале энергий 15-180 ГэВ. В то же время, рассчитанные подобным образом коэффициенты корректны только для единственной псевдобыстроты, в то время как значения параметров должны отличаться в том случае, когда сигнал производят фотоны, а не электроны. Возникает также вопрос о том, как экстраполировать эти результаты для значений, лежащих за границами интервала энергий, в котором они были получены. Для 10 ГэВ уже наблюдались серьезные отклонения от линейности сигнала. В заключение стоит отметить, что калибровка в первую очередь должна приводить к корректной реконструкции энергии порождающей ливень частицы. Это условие серьезно отличается от требований касательно ширины распределения сигналов, линейности сигнала или других желаемых особенностей, которые часто формируют основу методики калибровки [12, 13].

4 Параметризация электромагнитного ливня

Параметризация электромагнитного ливня заключается в получении аналитической зависимости, связывающей пространственное энергетическое распределение электромагнитного ливня с координатами частицы, инициирующей ливень при попадании в детектор, и энергией этой частицы. Необходимость параметризации обычно обусловлена желанием ускорить процесс симуляции без снижения точности однако, параметризация ливня может также использоваться для уточнения калибровочных коэффициентов. Параметризация в гомогенных калориметрах может использоваться как первое приближение параметризации ливня в моделях для гетерогенных калориметров. Пространственное энергетическое распределение описывается тремя функциями плотности вероятности:

$$dE(\vec{r}) = E f(t) dt f(r) dr f(\varphi) d\varphi, \quad (4)$$

соответствующими продольному, радиальному и азимутальному распределениям энергии. В этой формуле t обозначает продольную длину ливня в единицах радиационной длины, r – радиальное расстояние в Мольеровских радиусах от оси распространения ливня, φ – азимутальный угол. Начало ливня определяется точкой в пространстве, в которой первый из электронов или позитронов испускает квант тормозного излучения. Известно, что средний продольный профиль электромагнитного ливня может описываться гамма-распределением [14]:

$$\left\langle \frac{1}{E} \frac{dE(t)}{dt} \right\rangle = f(t) = \frac{(\beta t)^{\alpha-1} \beta \exp(-\beta t)}{\Gamma(\alpha)} \quad (5)$$

Центр тяжести $\langle t \rangle$, и глубина максимума ливня T могут быть вычислены через параметр формы α и параметр масштаба β следующим образом

$$\langle t \rangle = \frac{\alpha}{\beta}, \quad (6)$$

$$T = \frac{\alpha - 1}{\beta}. \quad (7)$$

Множество различных функций, описывающих среднюю радиальную компоненту ливня

$$f(r) = \frac{1}{dE(t)} \frac{dE(t, r)}{dr}, \quad (8)$$

могут быть найдены в различной специализированной литературе. В этой работе предлагается использовать следующую двухкомпонентную подстановку, которая является расширением формулы, предложенной в [15]:

$$f(r) = \rho f_c(r) + (1 - \rho) f_T(r) = \rho \frac{2r R_c^2}{(r^2 + R_c^2)^2} + (1 - \rho) \frac{2r R_T^2}{(r^2 + R_T^2)^2} \quad (9)$$

где $0 \leq \rho \leq 1$, $R_c(R_T)$ – медиана серединной (хвостовой) компоненты, ρ – вероятность, задающая серединный вес компоненты.

Азимутальное энергетическое распределение равномерно:
 $f(\varphi) = 1/2\pi$.

5 Моделирование энергетического разрешения калориметра

Моделирование электронного ливня в калориметре *ECAL* производилось с использованием программного пакета *GEANT4*. Ранее в научной группе ТПУ/*NA64* была создана цифровая модель гетерогенного электромагнитного калориметра (рис. 14), состоящего из чередующихся пластин из свинца, толщиной 1,5 мм, и сцинтиллятора из полиметилметакрилата, толщиной 1,55 мм. Геометрия калориметра и сценарии моделирования настраивались через соответствующие конфигурационные файлы.

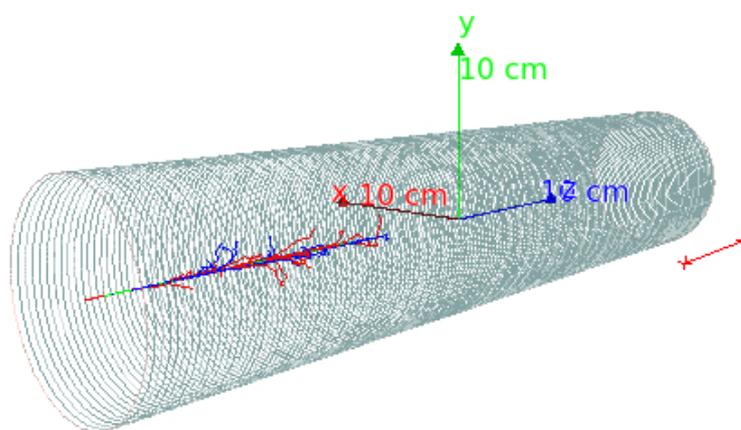


Рисунок 14 – Модель калориметра *ECAL*, *GEANT4*

Для вычисления энергетического разрешения калориметра необходимо знать среднеквадратичное отклонение совокупного энерговыделения (высвеченная энергия) от среднего значения (квази-)моноэнергетического пучка, которое выражается как корень из суммы квадратов энерговыделения в ячейках:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{36} \sigma_i^2}. \quad (10)$$

В свою очередь выражение для среднеквадратичного отклонения энерговыделения в ячейке:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}, \quad (11)$$

где n – число событий; x_k – энерговыделение в k -м событии; \bar{x} – среднее энерговыделение в ячейке.

Выражение (11) путём простых преобразований сводится к

$$\sigma_i = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2 \right\}. \quad (12)$$

Проводилось моделирование попадания электрона в детектор для 500 событий в диапазоне энергий электрона от 10 до 100 ГэВ. После чего по формуле (12) вычислялось значение энергетического разрешения для заданной энергии. Полученная зависимость энергетического разрешения калориметра ECAL представлена на рис. 15 звездочками.

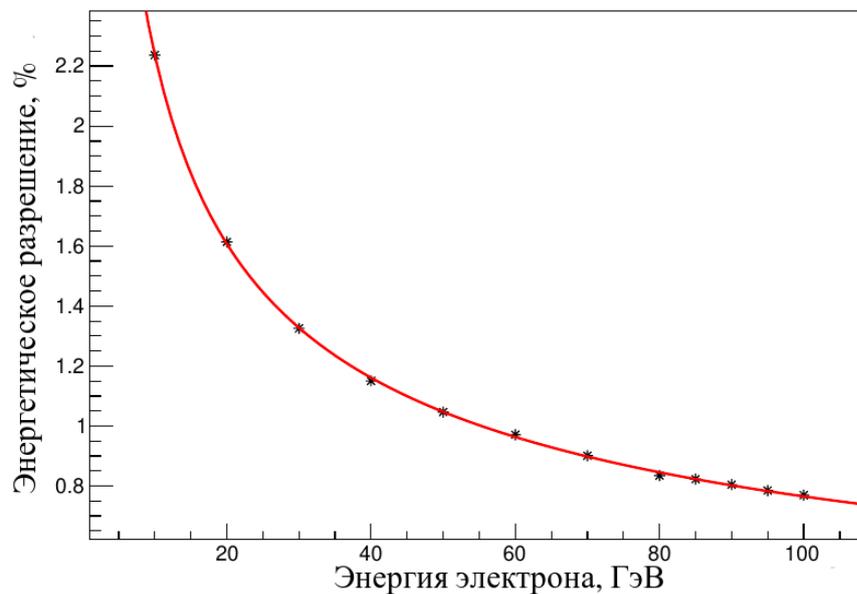


Рисунок 15 – Зависимость энергетического разрешения электромагнитного калориметра *ECAL* от энергии электрона, инициирующего ливень

Зависимость энергетического разрешения сэмплирующего калориметра от энергии пучка можно описать так [16]:

$$\frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{E}} \left(\frac{t}{X_t} \right)^\alpha \left(\frac{s}{X_s} \right)^{-\beta}, \quad (13)$$

где X_t и X_s – радиационные длины поглотителя и сцинтиллятора соответственно, σ_s – среднеквадратичное отклонение высвеченной энергии, E_s – высвеченная энергия, α , β и σ_0 – параметры аппроксимирующей функции.

Однако, зависимость, изображенную на рис. 15 удается аппроксимировать формулой (13) с достаточной точностью только введя дополнительное постоянное слагаемое. Ключевой особенностью такого слагаемого является то что флуктуация не зависит от энергии ливня. Такая аппроксимация изображена на рис. 15 красной кривой. Необходимость добавления постоянного слагаемого можно объяснить влиянием таких факторов как энергетические утечки, неустраняемые флуктуации и ошибка вычисления высвеченной энергии, возникающая при суммировании множества маленьких значений.

6 Моделирование энергетических утечек

Как было упомянуто в предыдущем разделе, одной из причин, обуславливающих необходимость добавления константного слагаемого к формуле (13), могут являться неустранимые энергетические утечки.

Увеличение геометрических размеров калориметра должно приводить к росту энергии, поглощенной в материале детектора. И, при достаточно больших размерах калориметра, ожидается достижение равенства между поглощенной энергией и энергией пучка, порождающего электромагнитный ливень.

Было установлено, что при увеличении числа продольных сегментов от 150 до 1000 и увеличении радиуса детектора от 40 мм до 200 мм энергетические утечки в среднем уменьшились от 10 ГэВ до 200 МэВ. Однако, дальнейшее увеличение размеров детектора не приводило к снижению величины утечки.

Геометрическая особенность калориметров типа "шашлык", а именно – чередование плоских пластин из материалов, физические свойства которых отличаются очень значительно, приводит к предположению о том, что гамма-кванты, попадая в сцинтиллятор под достаточно большими углами, относительно продольной оси калориметра могут, в результате многократного отражения от границы раздела сред сцинтиллятора и свинца, покидать детектор без поглощения (в особенности это касается мягких фотонов падающих на границу раздела под углом большим угла полного внутреннего отражения).

Для проверки этой гипотезы были получены угловые распределения гамма-квантов, покидающих объем детектора для различных размеров детектора. Угловые распределения при энергии пучка 100 ГэВ и 1000 продольных слоев для малых и больших размеров детектора показаны на рис. 16 и рис. 17 соответственно.

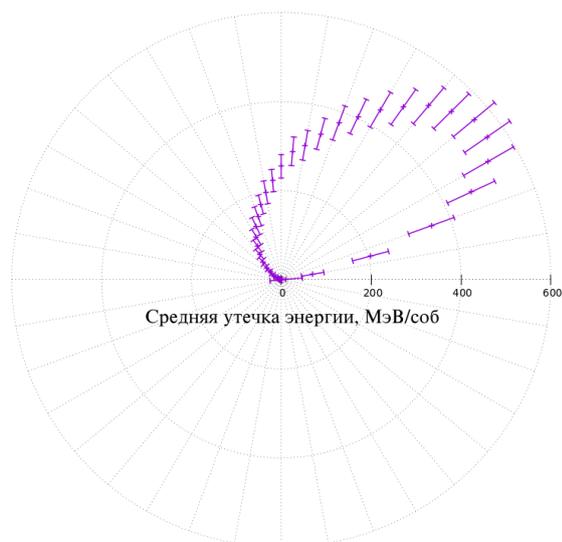


Рисунок 16 – Угловое распределение гамма-квантов, покидающих калориметр с радиусом 40 мм (на графике указана ошибка, соответствующая одному σ)

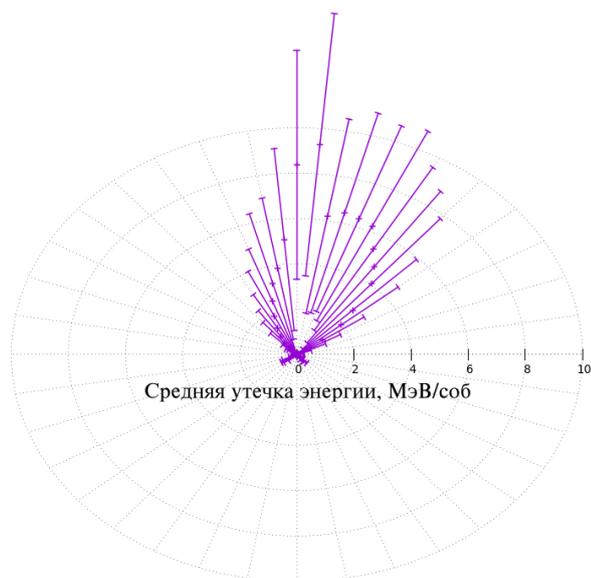


Рисунок 17 – Угловое распределение гамма-квантов, покидающих калориметр с радиусом 200 мм (на графике указана ошибка, соответствующая одному σ)

Можем заметить, что частицы действительно покидают калориметр под большими углами к продольной оси детектора, что подтверждает догадку о многократном отражении внутри сцинтилляторных слоёв. Однако, средняя энергия, покидающая детектор, уменьшается более чем на

два порядка при увеличении радиуса детектора от 40 до 200 мм. При дальнейшем увеличении радиуса калориметра достигается полное отсутствие утечки гамма-квантов.

Таким образом, утечка гамма-квантов из калориметра не может приводить к независимым от энергии пучка флуктуациям. Единственной оставшейся причиной неустранимых утечек могут быть слабо взаимодействующие частицы, рождающиеся в фотоядерных реакциях, например – нейтроны.

7 Аппроксимация профиля ливня

В результате моделирования электромагнитного ливня были получены значения энергосвечения для каждого сегмента калориметра. После чего осуществлялась аппроксимация профиля ливня функциями (5) и (9), используя процедуры библиотеки *GSL* [17]. Аппроксимированные радиальные профили представлены на рис. 18, 19, 20, продольный – на рис. 21.

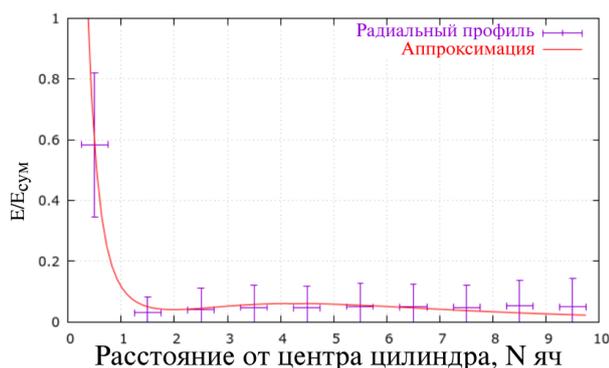


Рисунок 18 – Радиальный профиль ливня в 1-й ячейке вдоль оси распространения

Радиальный профиль в самом начале ливня представляет собой резко убывающую кривую, напоминающую график экспоненты. Это объясняется тем, что в начале ливня число рожденных частиц невелико и образуются они близко к оси, вдоль которой происходит развитие ливня.

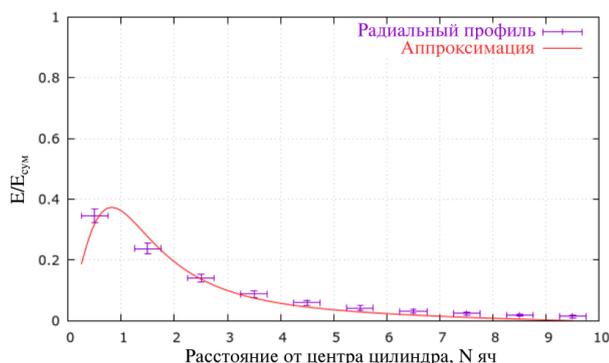


Рисунок 19 – Радиальный профиль ливня в 40-й ячейке вдоль оси распространения (спадание у нуля является численным артефактом фитирующей функции)

Распределение энергии в области интенсивного энерговыделения становится шире и появляется максимум энерговыделения, соответствующий концу первой ячейки в направлении от центра детектора к периферии.

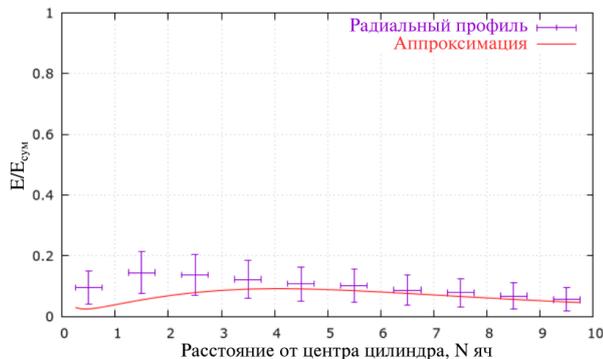


Рисунок 20 – Радиальный профиль ливня в 85-й ячейке вдоль оси распространения

Радиальное распределение энергии в области затухания ливня становится очень гладким со слабо выраженным максимумом во второй ячейке.

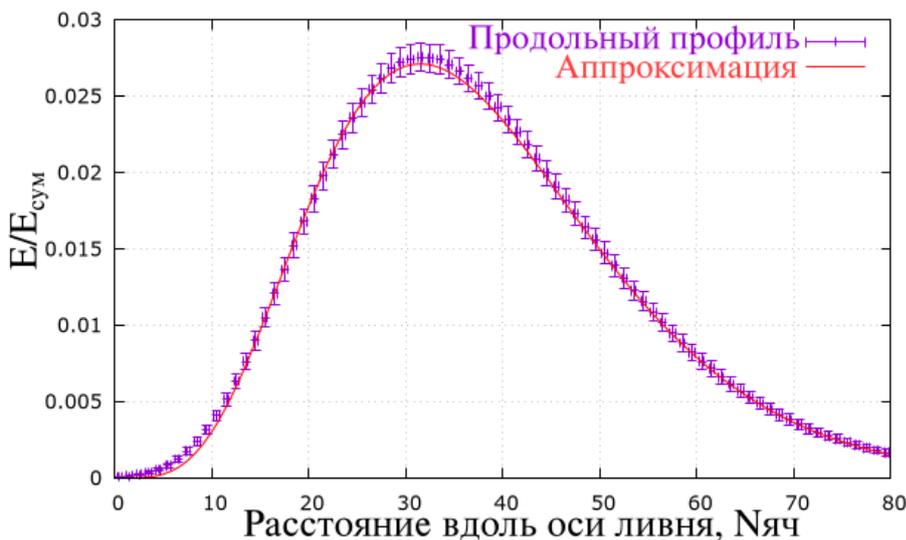


Рисунок 21 – Продольный профиль ливня

Трехмерный график энерговыделения в калориметре и аппроксимация энерговыделения факторизованной функцией показаны на рис. 22.

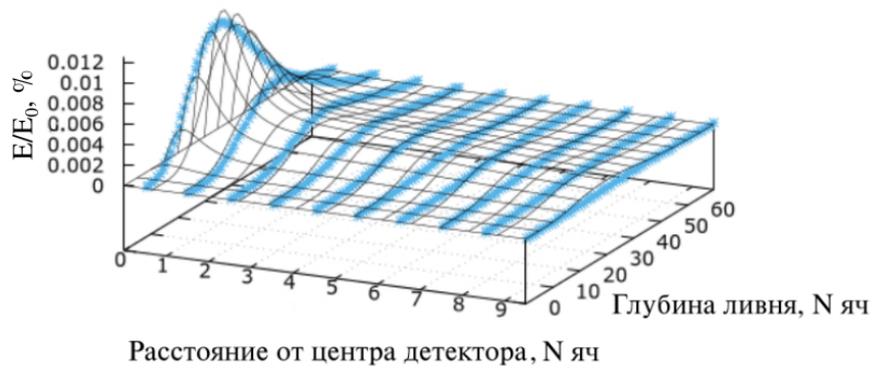


Рисунок 22 – Аппроксимация электромагнитного ливня факторизованной функцией

Осуществили интегрирование функции, аппроксимирующей профиль ливня, в областях, ограничивающих ячейку, на которую приходится ось развития ливня, ячейку, имеющую с центральной смежную грань, и ячейку, расположенную относительно центральной по диагонали, для предливневой и основной части калориметра ECAL. Значения, полученные в результате интегрирования, отнесенные к энергии пучка, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Энерговыведение в ячейках калориметра ECAL

Ячейка	$E/E_0, \%$	
	Предливневая часть	Основная часть
Центральная	1,55	37,79
Смежная	0,16	3,93
Диагональная	0,09	2,27

8 Извлечение калибровочных коэффициентов

На основе набора данных калибровочной статистики, можно получить значения энерговыделения в калориметре в результате бомбардировки электронами каждой из 36 ячеек. После чего, осуществляя отбор по отдельным ячейкам, получили распределения энергии, поглощенной в каждой ячейке. Такое распределение для одной из центральных ячеек основной части калориметра показано на рис. 23.

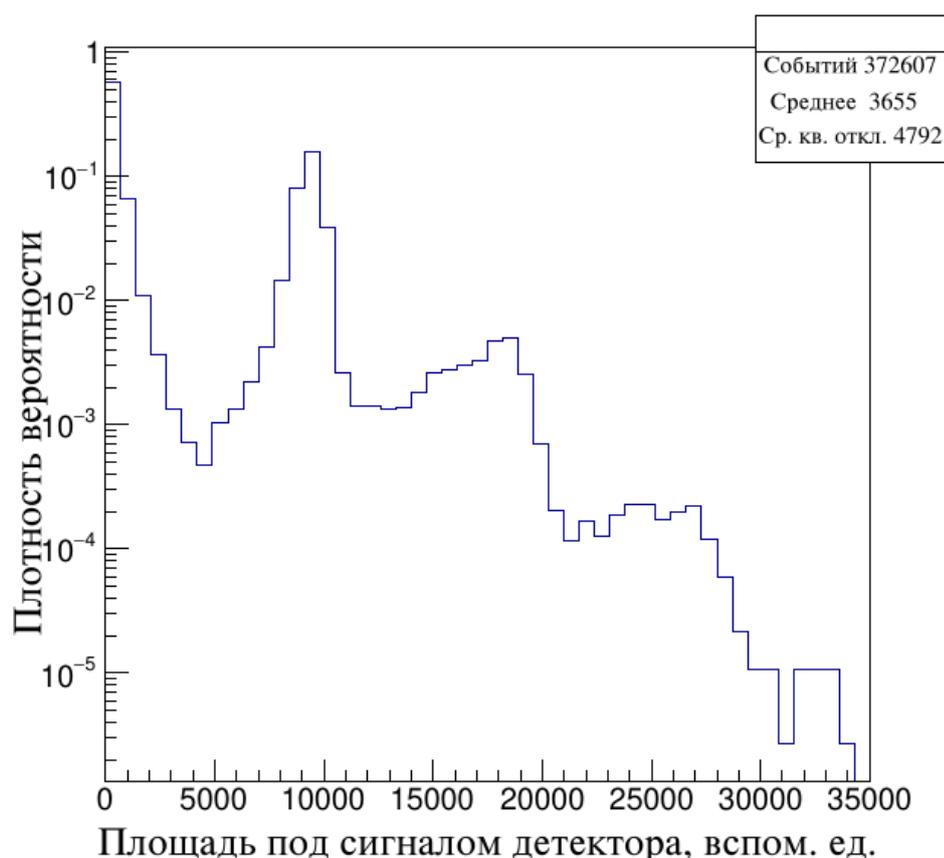


Рисунок 23 – Распределение энерговыделения в одной из центральных ячеек осовной части калориметра

В распределении выделяются три области:

1) Область низких значений, первый пик. Ей соответствуют события, в которых основное энерговыделение произошло в других ячейках, а сигнал в рассматриваемой ячейке обусловлен поглощением энергии достигших ее вторичных частиц.

2) Центральная область. Соответствует сигналу ячейки, через которую проходит ось распространения электромагнитного ливня при

нормальном попадании пучка электронов в детектор. Исключительно значения из этой области должны учитываться при вычислении калибровочных коэффициентов.

3) Область высоких значений. Вклад в эту область вносят два или более попадания частицы в детектор, разнесенные во времени на достаточно малый промежуток, из-за чего они обрабатываются как одно событие. Такие сигналы следует дискриминировать как зашумляющие.

Для того, чтобы обрабатывать события, соответствующие только центральному пику основного сигнала, был реализован алгоритм, поиска и отбора пиков, результат использования которого показан на рис. 24.

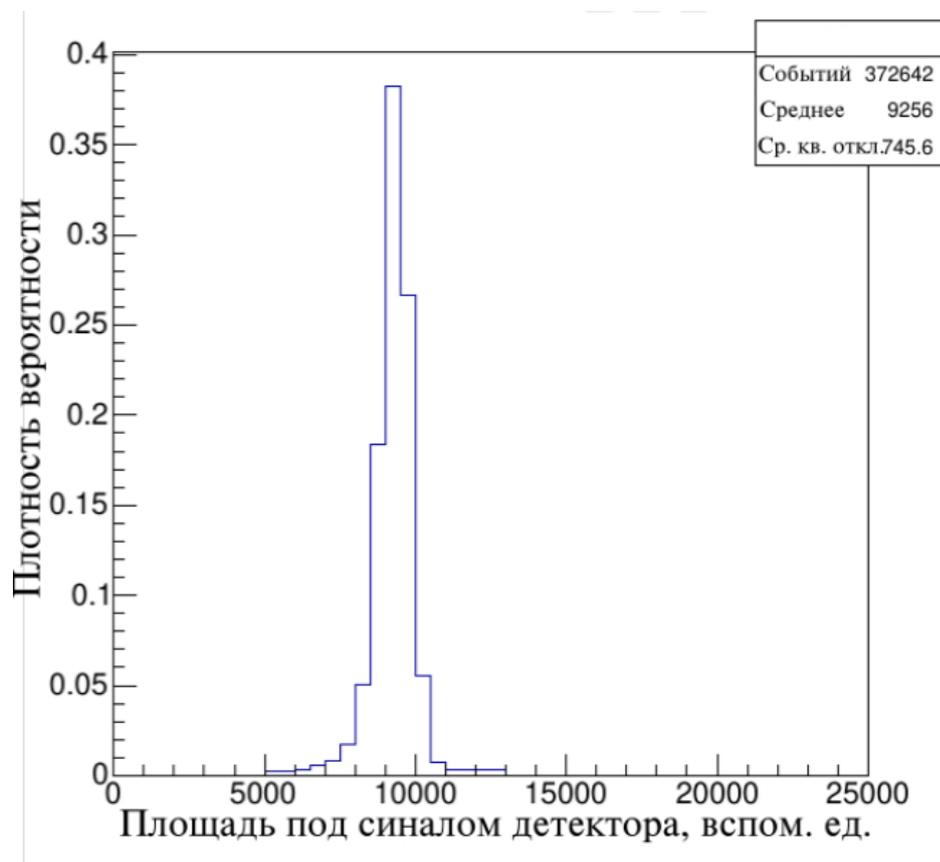


Рисунок 24 – Распределение энерговыделения в одной из центральных ячеек осовной части калориметра после дискриминации вторичных пиков

После выделения центрального пика распределения, для каждой ячейки был получен интервал значений энерговыделения, подходящий для расчета калибровочных коэффициентов.

Калибровочный коэффициент для каждой ячейки вычислялся как отношение долей энерговыделения, расчет которых описан в предыдущем

разделе, к значению энергосодержания из распределения. Таким образом были получены распределения калибровочных коэффициентов (рис. 25). Распределения коэффициентов аппроксимировались нормальным распределением, положение максимума которого принималось за усредненное значение коэффициента.

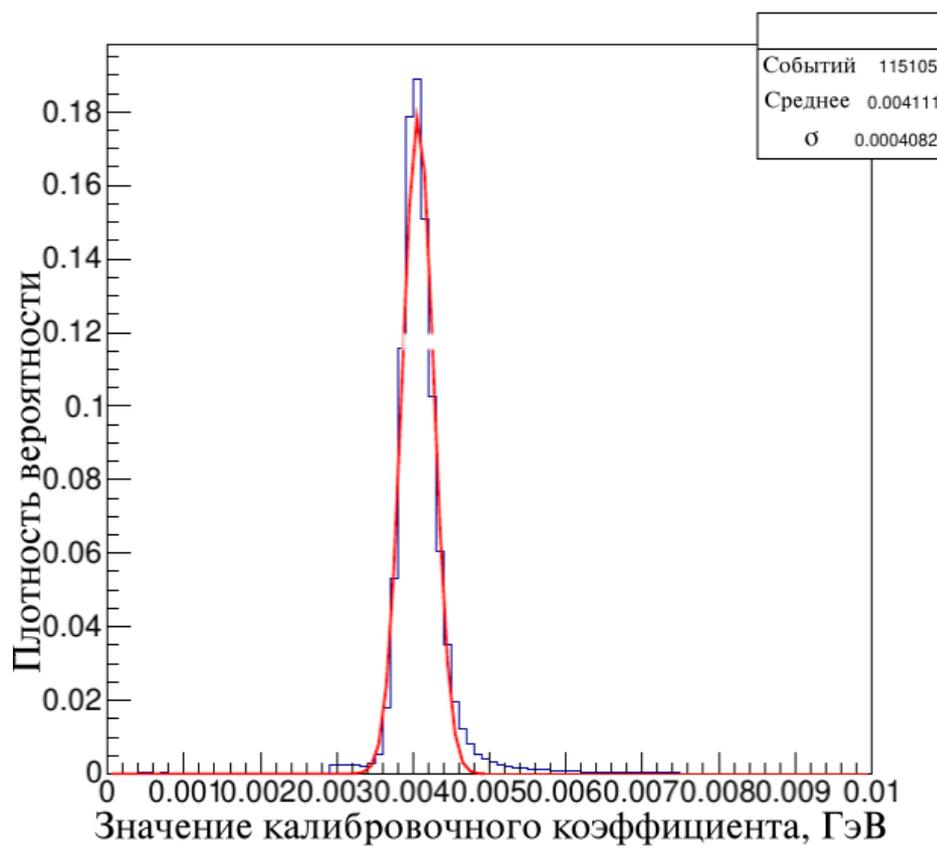


Рисунок 25 – Распределение калибровочных коэффициентов для одной из центральных ячеек осевой части калориметра

Рассчитанные значения калибровочных коэффициентов для каждой ячейки предливневой и главной части электромагнитного калориметра ECAL представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Калибровочные коэффициенты электромагнитного калориметра ECAL

Индексы ячейки		Калибровочный коэффициент	Среднеквадратичное отклонение	Индексы ячейки		Калибровочный коэффициент	Среднеквадратичное отклонение
x	y	Предливневая часть		x	y	Основная часть	
0	0	0.00036	0.00030	0	0	0.00412	0.00048
0	1	0.00035	0.00028	0	1	0.00402	0.00051
0	2	0.00036	0.00021	0	2	0.00394	0.00046
0	3	0.00030	0.00018	0	3	0.00451	0.00046
0	4	0.00026	0.00017	0	4	0.00435	0.00046
0	5	0.00029	0.00019	0	5	0.00392	0.00041
1	0	0.00036	0.00029	1	0	0.00379	0.00046
1	1	0.00032	0.00027	1	1	0.00377	0.00041
1	2	0.00028	0.00018	1	2	0.00459	0.00043
1	3	0.00032	0.00020	1	3	0.00439	0.00048
1	4	0.00029	0.00018	1	4	0.00401	0.00038
1	5	0.00025	0.00017	1	5	0.00438	0.00045
2	0	0.01000	0.00001	2	0	0.00389	0.00050
2	1	0.00037	0.00030	2	1	0.00378	0.00030
2	2	0.00032	0.00028	2	2	0.00405	0.00038
2	3	0.00031	0.00019	2	3	0.00385	0.00036
2	4	0.00032	0.00019	2	4	0.00384	0.00038
2	5	0.00029	0.00025	2	5	0.00415	0.00040
3	0	0.00033	0.00028	3	0	0.00462	0.00051
3	1	0.00030	0.00025	3	1	0.00420	0.00048
3	2	0.00030	0.00019	3	2	0.00402	0.00044
3	3	0.00029	0.00019	3	3	0.00406	0.00041
3	4	0.00028	0.00018	3	4	0.00418	0.00038
3	5	0.00039	0.00030	3	5	0.00456	0.00043
4	0	0.01000	0.00000	4	0	0.00399	0.00049
4	1	0.00043	0.00032	4	1	0.00367	0.00025
4	2	0.00035	0.00028	4	2	0.00398	0.00048
4	3	0.00028	0.00023	4	3	0.00379	0.00044
4	4	0.00029	0.00025	4	4	0.00421	0.00039
4	5	0.00027	0.00017	4	5	0.00422	0.00049
5	0	0.00031	0.00028	5	0	0.00364	0.00027
5	1	0.00032	0.00027	5	1	0.00444	0.00054
5	2	0.00026	0.00017	5	2	0.00423	0.00047
5	3	0.00030	0.00025	5	3	0.00420	0.00045
5	4	0.00056	0.00038	5	4	0.00415	0.00046
5	5	0.00032	0.00026	5	5	0.00465	0.00041

После применения полученных калибровочных коэффициентов к

экспериментальным данным 2017 года, было получено распределение реконструированного энерговыделения в электромагнитном калориметре (рис. 26).

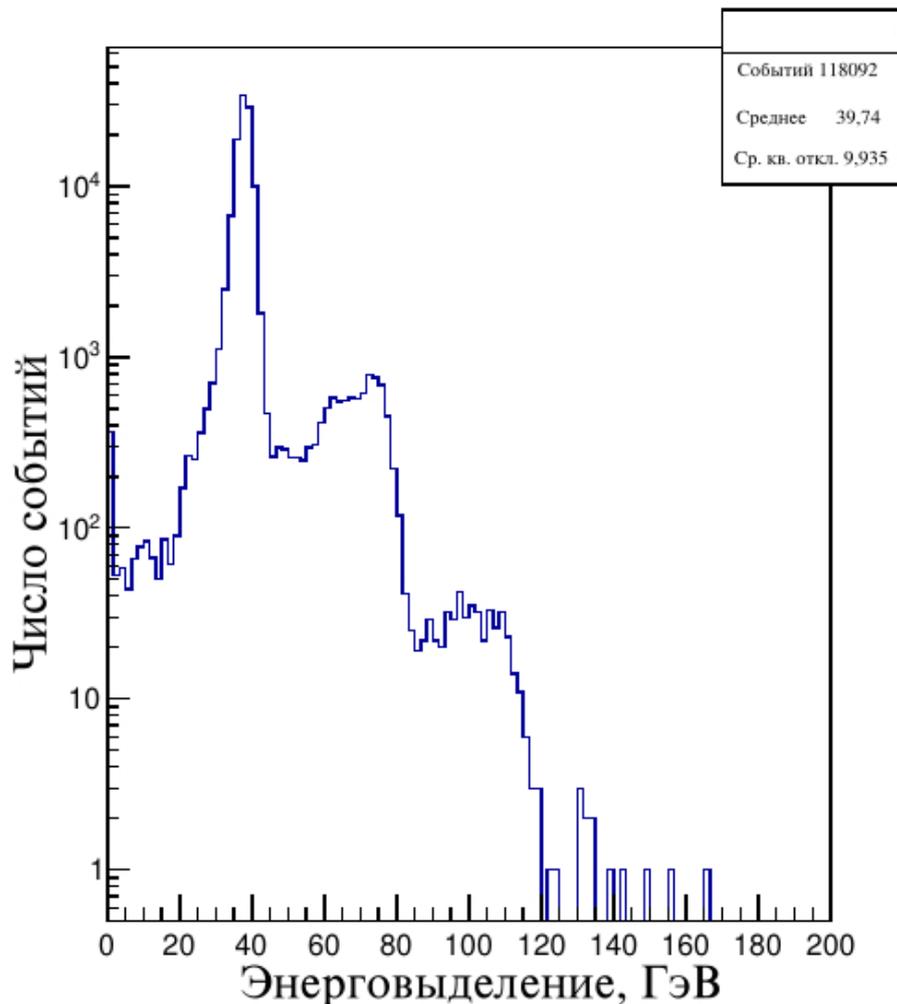


Рисунок 26 – Распределение реконструированного энерговыделения

Калибровочным моноэнергетическим событиям, не зашумленным попаданиями нескольких частиц во временной интервал записи АЦП, соответствует первый пик распределения, приходящийся на 40 ГэВ. Второй и третий пик соответствуют *pile-up* событиям от двух и трех частиц соответственно. Очевидно, что результат, при котором энерговыделение большинства событий от попадания электронного пучка с энергией 100 ГэВ в электромагнитный калориметр оценивается в 40 ГэВ, свидетельствует о недооценке.

Вероятные причины ошибки:

- 1) Неточность *GEANT4* модели электромагнитного калориметра.

2) Грубое приближение при аппроксимации профиля ливня формулой, полученной для гомогенного калориметра, приводящее к зависимости радиального профиля от глубины ливня.

3) Нелинейность преобразования энергии в веществе сцинтиллятора по отношению к энергии поглощённой в свинце.

Последнюю причину следует разобрать более подробно. Сигнал калориметра образует преимущественно энергия, поглощенная в сцинтилляторе. Это значит, что для калибровки следовало бы использовать только энерговыделение в слоях полиметилметакрилата. При дальнейшем усовершенствовании процедуры калибровки предполагается исключать из рассмотрения энерговыделение в свинце путём введения дополнительного множителя в формулу, аппроксимирующую профиль ливня. Однако понимание этой методической ошибки приводит к некоторым интересным заключениям.

Отбирая события с наименьшим энерговыделением в адронном калориметре *HCAL*, расположенном в телескопе детекторов позади калориметра *ECAL* можно добиться того, что совокупная энергия, поглощенная в электромагнитном калориметре, будет соответствовать событиям с наибольшей герметичностью. Распределения энерговыделения с возрастающим ограничением по энергии, поглощенной в адронном калориметре, представлены на рис. 27, 28, 29 и 30.



Рисунок 27 – Распределение реконструированного энерговыделения (ограничение энергии, выделившейся в адронном калориметре 20000 вспом. ед.)

В распределении (рис. 27) различимы области, соответствующие аппаратным шумам, одиночным событиям, двойным и тройным *pile-up* событиям.



Рисунок 28 – Распределение реконструированного энерговыделения (ограничение энергии, выделившейся в адронном калориметре 20000 вспом. ед.)

В распределении (рис. 28) пропадает участок аппаратного шума.

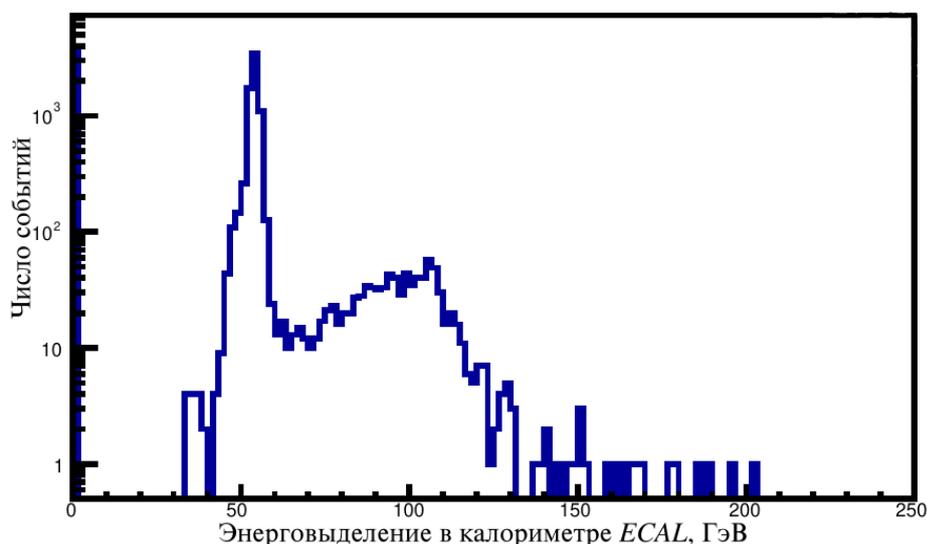


Рисунок 29 – Распределение реконструированного энерговыведения (ограничение энергии, выделившейся в адронном калориметре 400 вспом. ед.)

В распределении (рис. 29) пропадает область, соответствующая тройным *pile-up* событиям.

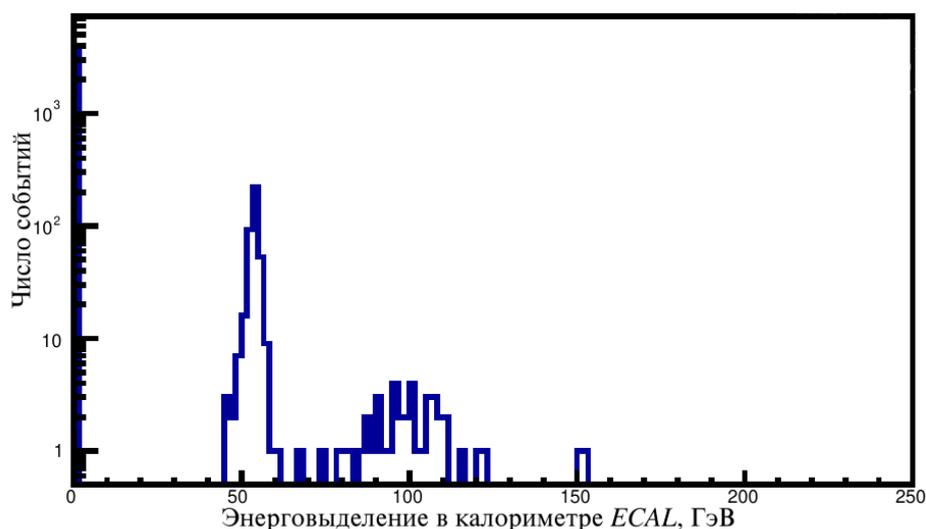


Рисунок 30 – Распределение реконструированного энерговыведения (ограничение энергии, выделившейся в адронном калориметре 300 вспом. ед.)

В распределении (рис. 30) практически не остается *pile-up*-событий, центральный пик, приходящийся на 55 ГэВ, – основной сигнал. Можно отметить, что положение пика и его форма не изменяются после

дискриминации зашумляющих событий. Такому поведению соответствует случай, в котором алгоритм калибровки выстроен верно, но значения коэффициентов определены с методологической ошибкой, обусловленной недооценкой влияния пространственной анизотропии преобразования энергии выделившейся в веществе калориметра в световую.

9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

9.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Калибровка детектора является одной из наиболее важных операций, предшествующих физическому эксперименту. Основной целью калибровки является установление соответствия между энергией, выделившейся в материале детектора при прохождении через него частицы или пучка частиц, и сигналом детектора. Неточности калибровки могут привести к значительным ошибкам при измерении поглощенной энергии, что снижает достоверность результата эксперимента.

9.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Единственными потребителями этой научно-исследовательской работы могут быть коллаборации экспериментов, использующих гетерогенные электромагнитные калориметры схожего устройства с калориметром *ECAL* эксперимента *NA64*. Адаптировать работу под промышленность не представляется возможным.

9.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Существует несколько методик калибровки гетерогенных калориметров, применяющихся в различных экспериментах. Для предварительной оценки эффективности научной работы был проведен детальный анализ конкурентных методик калибровки. Такой анализ позволяет оценить сильные и слабые стороны конкурирующих методик, и, если это необходимо, внести своевременные коррективы в рассматриваемую методику для поддержания ее конкурентоспособности.

Анализ конкурентных технических решений проводился с использованием оценочной карты, приведенной в таблице 3. В этой таблице сравниваются критерии технической ресурсоэффективности и

экономической эффективности различных методик калибровки. Численное значение каждого критерия выбирается экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 –наиболее низкое значение, а 5 –наиболее высокое. Значения весов критериев определяются экспертным путем так, чтобы их сумма равнялась 1. Значения критериев трудоемкости и технической сложности тем выше, чем проще конкретный метод в реализации.

1) B_{ϕ} – калибровка с использованием параметризации электромагнитного ливня.

2) $B_{к1}$ – калибровка методом минимизации разности между энергией пучка и суммой реконструированного энерговыделения в каждом сегменте.

3) $B_{к2}$ – индивидуальная калибровка каждого сегмента.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{к1}$	$B_{к2}$	K_{ϕ}	$K_{к1}$	$K_{к2}$
Технические критерии методики калибровки							
1. Точность калибровки	0,3	4	2	3	1,2	0,6	0,9
2. Трудоемкость	0,1	4	2	1	0,4	0,2	0,1
3. Универсальность	0,2	5	1	2	1	0,2	0,4
4. Техническая сложность	0,15	5	2	1	0,75	0,3	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							
5. Финансирование научной разработки	0,1	1	5	5	0,1	0,5	0,5
6. Стоимость осуществления калибровки	0,15	1	5	5	0,15	0,75	0,75
Итого:	1				3,60	2,55	2,80

По результатам проведенного анализа можно сделать заключение, что метод калибровки с использованием Монте-Карло модели и параметризации ливня превосходит конкурирующие методы. Причиной этому служат следующие особенности:

1) Тщательное моделирование приводит к точным результатам, не зависящим от инструментальных особенностей;

2) использование модели позволяет путем небольших изменений получить значения калибровочных коэффициентов для различных частиц, инициирующих ливень;

3) использование модели осуществляется без проведения экспериментов, что приводит к высокой экономической эффективности методики и малым трудозатратам.

9.1.3 SWOT-анализ

SWOT – *Strengths* (сильные стороны), *Weaknesses* (слабые стороны), *Opportunities* (возможности) и *Threats* (угрозы) – комплексный анализ научно-исследовательского проекта, проводящийся в несколько этапов. Результаты первого этапа *SWOT*-анализа, заключающегося в выявлении сильных и слабых сторон проекта, возможностей его развития и угроз, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Первый этап *SWOT*-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
1. Отсутствие необходимости проведения эксперимента. 2. Высокая точность.	1. Отсутствие возможности учета некоторых технических особенностей. 2. Неустраняемая погрешность моделирования.
Возможности	Угрозы
1. Калибровка электромагнитных калориметров с различными геометриями. 2. Возможность калибровки для различных частиц, инициирующих электромагнитный ливень.	1. Получение калибровок другими методами. 2. Невостребованность исследований в данном направлении из-за появления новых экспериментальных фактов.

Второй этап заключается в построении интерактивных матриц возможностей и угроз, позволяющих оценить эффективность проекта, а

также надежность его реализации, на основании матрицы SWOT. Соотношения параметров представлены в таблицах 5,6,7 и 8.

Таблица 5 – Интерактивная оценка проекта ”Сильные стороны и возможности”

Сильные стороны			
Возможности проекта		C1	C2
	B1	+	-
	B2	+	+

Таблица 6 – Интерактивная оценка проекта ”Слабые стороны и возможности”

Слабые стороны			
Возможности проекта		Сл1	Сл2
	B1	+	-
	B2	+	-

Таблица 7 – Интерактивная оценка проекта ”Сильные стороны и угрозы”

Сильные стороны			
Угрозы		C1	C2
	У1	+	-
	У2	+	-

Таблица 8 – Интерактивная оценка проекта ”Слабые стороны и угрозы”

Слабые стороны			
Угрозы		C1	C2
	У1	-	-
	У2	+	-

Таким образом, в рамках третьего этапа была составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 9).

Таблица 9 – Итоговая матрица *SWOT*-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>1. Отсутствие необходимости проведения эксперимента.</p> <p>2. Высокая точность</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>1. Отсутствие возможности учета некоторых технических особенностей.</p> <p>2. Неустраняемая погрешность моделирования.</p>
<p>Возможности:</p> <p>1. Калибровка электромагнитных калориметров с различными геометриями.</p> <p>2. Возможность калибровки для различных частиц, инициирующих электромагнитный ливень.</p>	<p>Отсутствие необходимости в эксперименте позволяет путем небольших изменений применить методику калибровки в различных экспериментах с разными установками и пучками частиц</p>	<p>Увеличение сложности модели позволит расширить число ее возможных применений</p>
<p>Угрозы:</p> <p>1. Получение калибровок другими методами.</p> <p>2. Невостребованность исследований в данном направлении из-за появления новых экспериментальных фактов.</p>	<p>Отсутствие необходимости в эксперименте позволяет предлагать методику калибровки в эксперименты, детекторы которых ранее были откалиброваны недостаточно точно</p>	<p>При серьезных изменениях в технологии проведения эксперимента приспособление такой модели к новым техническим особенностям может оказаться нецелесообразным или даже невозможным</p>

В результате *SWOT*-анализа показана перспективность работы в виду ее универсальности и отсутствия привязки к конкретному эксперименту. Наиболее значимая уязвимость заключается в том, что в большинстве экспериментов используются методы калибровки, основанные непосредственно на физических измерениях, которые стали уже классическими.

9.2 Планирование научно-исследовательских работ

9.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование призвано обеспечить рациональное использование времени и при формировании научно-исследовательской работы является, несомненно, важным этапом. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;

— построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли: научный руководитель и студент-бакалавр. В данном разделе был составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, который представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, бакалавр
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Научный руководитель, бакалавр
	3	Побор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, бакалавр
	4	Разработка методики выполнения работ	Научный руководитель
	5	Составление календарного плана	Научный руководитель, бакалавр
Теоретическое исследование	6	Поиск литературы	Научный руководитель, бакалавр
	7	Изучение литературы	Бакалавр
Практическая часть	8	Моделирование электромагнитного ливня	Бакалавр
	9	Расчет энергетического разрешения калориметра	Бакалавр
	10	Калибровка калориметра	Бакалавр
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, бакалавр
Провередие ВКР			
Оформление комплекта документации по ВКР	12	Составление отчета	Бакалавр

9.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожi}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{мини} + 2t_{маxi}}{5}, \quad (14)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; $t_{мини}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; $t_{маxi}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях, учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (15)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

9.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

В соответствии с календарным планом выполнения работ был построен ленточный график выполнения дипломной работы в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ки} = k_{кал} \cdot T_{pi}, \quad (16)$$

где $T_{ки}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (17)$$

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

Таким образом:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 14 - 104} = 1,48.$$

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу 11.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Содержание работы	Исполнитель	t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	Ч	$T_{п}$	$T_{к}$
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель , бакалавр	2	4	2,8	2	0,7	1,0
2	Выбор направления исследований	Руководитель , бакалавр	2	3	2,4	2	1,2	1,8
3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель , бакалавр	5	7	5,8	2	2,9	4,3
4	Разработка методики выполнения работ	Руководитель , бакалавр	2	3	2,4	2	1,2	1,8
5	Составление календарного плана	Руководитель	1	2	1,4	1	1,4	2,1
6	Поиск литературы	Руководитель , бакалавр	2	3	2,4	2	1,2	1,8
7	Изучение литературы	Бакалавр	7	14	9,8	2	4,9	7,3
8	Моделирование электромагнитного ливня	Бакалавр	2	4	4,2	1	2,8	4,1
9	Расчет энергетического разрешения калориметра	Бакалавр	2	4	4,2	1	2,8	4,1
10	Калибровка калориметра	Бакалавр	3	6	7	1	3,2	4,7
11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2	3	2,4	1	2,4	3,6
12	Составление отчета	Бакалавр	7	14	9,8	1	8,8	14,5

На основании полученных данных был построен план-график в виде диаграммы Ганта. График строится с разбивкой по месяцам и неделям (7дней) за период времени дипломирования.

№	Вид работ	T _{кi}	Исполнитель	Продолжительность выполнения работ									
				Апрель				Май					
				1	2	3	4	1	2	3	4		
1	Составление и утверждение технического задания	1,0	Р	■									
			Б	■									
2	Выбор направления исследований	1,8	Р	■									
			Б	■									
3	Подбор и изучение материалов по теме	4,3	Р	■	■								
			Б	■	■								
4	Разработка методики выполнения работ	1,8	Р		■								
			Б		■								
5	Составление календарного плана	2,1	Р		■								
6	Поиск литературы	1,8	Р		■								
			Б		■								
7	Изучение литературы	7,3	Б			■	■						
8	Моделирование электромагнитного ливня	6,2	Б				■	■					
9	Расчет энергетического разрешения калориметра	6,2	Б					■	■				
10	Калибровка калориметра	10,4	Б						■	■			
11	Оценка эффективности полученных результатов	3,6	Р							■	■		
12	Составление отчета	14,5	Б								■	■	■

Рисунок 31 – Диаграмма Ганта

9.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) материальные затраты НТИ;
- 2) затраты на основное оборудование для научно-экспериментальных работ;
- 3) основная заработная плата исполнителей темы;
- 4) дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);

б) накладные расходы.

9.3.1 Расчет затрат на оборудование для научно-экспериментальных работ

Расчет затрат на оборудование сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения этой работы.

Норма амортизации вычисляется по следующей формуле:

$$N_a = \frac{1}{n}, \quad (18)$$

где n – срок полезного использования, измеряемый в годах.

Амортизация оборудования линейным способом рассчитывается следующим образом:

$$A = \frac{N_a \cdot m \cdot N}{12} \quad (19)$$

где N – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Единственным оборудованием, использованным в работе был ПК *DEXPMarsE320*, приобретенный в декабре 2020 года за 59999 рублей. Срок полезного использования ПК составляет 5 лет. В итоге общая сумма амортизационных отчислений составила:

$$A = \frac{0,2 \cdot 59999 \cdot 2}{12} = 1999,97 \approx 2000 \text{ руб.}$$

9.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии и доплаты) и дополнительную заработную плату. Также включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30 % от тарифа или оклада:

$$З_{зп} = З_{осн} = З_{доп} \quad (20)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (21)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником (таблица 11); $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{д}} = \frac{Z_{\text{м}}}{F_{\text{д}}} \quad (22)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; М – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб.дня М =11,2 месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб.дней М=10,4 месяца, 6-дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн. (таблица 11).

В таблице 12 приведен баланс рабочего времени каждого работника НТИ.

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Бакалавр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	104	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	24	24
– невыходы по болезни	7	7
Действительный годовой фонд рабочего времени	216	216

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (23)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,2; k_p – районный коэффициент, для г. Томска равный 1,3.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет основной заработной платы

Категория	$Z_{тс}$, руб	k_d	$k_{пр}$	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб
Руководитель								
ППС3	22000	0,3	0,2	1,3	42900	2224,4	17,7	39372,7
Бакалавр								
ППС1	9000	0,3	0,2	1,3	17550	910,0	30,7	27937,0
Итого								67309,7

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (24)$$

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

Общая заработная исполнителей работы представлена в таблице 14.

Таблица 14 – Общая заработная плата исполнителей

Исполнитель	$Z_{осн}$, руб	$Z_{доп}$, руб	$Z_{зп}$, руб
Руководитель	39372,7	5905,9	45278,6
Бакалавр	27937,0	4190,6	32127,6
Итого	67309,7	10096,5	77406,1

9.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{пр}} \cdot (З_{\text{осн}} + (З_{\text{доп}})), \quad (25)$$

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

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб
Руководитель проекта	39372,7	5905,9
	27937,0	4190,6
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонты	0,302	
Итого:	23376,7	

9.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей } 1 \div 4), \quad (26)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 20 %.

$$Z_{\text{накл}} = 0,2 \cdot (2000,0 + 67309,7 + 10096,5 + 22362,1) = 20556,6 \text{ руб}$$

9.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	2000
2. Затраты по оновной заработной плате исполнителей темы	67309,7
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	10096,5
4. Отчисления во внебюджетные фонды	23376,7
5. Накладные расходы	20556,6
6. Бюджет затрат НТИ	12339,3

Как видно из таблицы 16 основные затраты НТИ приходится на заработную плату исполнителей.

9.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (27)$$

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 проекта (в т.ч. аналоги).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (28)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы 17.

Таблица 17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования \ Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Универсальность методики	0,4	5	1	2
2. Трудоемкость реализации	0,2	5	2	1
3. Учет инструментальных особенностей	0,4	1	5	5
Итого:	1	3,4	2,8	3

Сравнив значения интегральных показателей ресурсоэффективности можно сделать вывод, что реализация методики в текущем проекте является более эффективным вариантом для проектирования с позиции ресурсосбережения.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.2} = \frac{I_{р-исп.2}}{I_{финр.1}}, I_{исп.1} = \frac{I_{р-исп.1}}{I_{финр.1}}, \text{ и т. д.} \quad (29)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см. таблицу 18) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}. \quad (30)$$

Таблица 18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,97	0,97	1,00
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,40	2,80	3,00
3	Интегральный показатель эффективности	3,50	2,88	3,00
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,82	0,86

Вывод: сравнительный анализ интегральных показателей эффективности показывает, что предпочтительным для осуществления калибровки является первый вариант исполнения, так как является наиболее экономичным и ресурсоэффективным.

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1) В результате анализа конкурентных решений выяснили, что выбранная методика калибровки является наиболее эффективной.

2) В ходе планирования для руководителя, консультантов по социальной ответственности и экономической части и бакалавра был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 48 дней.

3) Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 123339,3 руб;

Результат оценки эффективности ИР показывает следующее:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,97;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 3.40, в то время как при других вариантах исполнения значения показателя составляют 2,80 и 3,00.

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 3,50 по сравнению с 2.88 и 3,00, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Раздел 5 Социальная ответственность

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы проводилось калибровка электромагнитного калориметра ЕСАL эксперимента NA64. Основная часть работы выполнялась на ПК, находящемся в лабораторной аудитории № 248 11-го корпуса ТПУ.

Работа заключалась в моделировании развития электромагнитного ливня, образованного в материале детектора иницирующей частицей и проведении расчетов, основанных на результатах моделирования.

1 Оценка вредных и опасных факторов

В данном пункте приведен анализ всех вредных и опасных факторов, которые могут возникать при работе в лаборатории. Все вредные и опасные факторы, характерные для лабораторной среды представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [18])	Нормативные документы
1. Микроклимат	ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [19]
2. Шум	ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1) [20]
3. Освещенность рабочей зоны	СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1) [21]
4. Пожароопасность	СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643) [22] ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [23]
5. Электробезопасность	ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) [24] ГОСТ Р 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность [25] ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи [26]
6. Радиационная безопасность	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 [27]

1.1 Микроклимат

Основными факторами, характеризующими микроклимат производственной среды, являются: температура, подвижность и влажность воздуха. Отклонение этих параметров от нормы приводит к ухудшению

самочувствия работника, снижению производительности его труда и к возникновению различных заболеваний.

Работа в условиях высокой температуры сопровождается интенсивным потоотделением, что приводит к обезвоживанию организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов, серьезным изменениям в деятельности сердечно-сосудистой системы, увеличению частоты дыхания, а также оказывает влияние на функционирование других органов и систем (ослабление внимания, ухудшение координации движений, замедление реакции тела и т.д.).

Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреву организма, при низкой же температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению организма. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

При нормировании метеорологических условий в производственных помещениях учитывают время года, физическую тяжесть выполняемых работ, а также количество избыточного тепла в помещении. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно [28] и приведены в таблице 20.

Для удобства работы в помещении необходимо нормирование параметров микроклимата, то есть необходимо проведение мероприятий по контролю способов и средств защиты от высоких и низких температур, системы отопления, вентиляции и кондиционированию воздуха, искусственное освещение и т.п.

Таблица 20 – Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	Не более 0,1
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	Не более 0,1

Для поддержания данных санитарных норм достаточно иметь естественную неорганизованную вентиляцию помещения и местный кондиционер установки полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха. Необходима система центрального отопления, обеспечивающая заданный уровень температуры в зимний период по [29]. В зимний период в аудитории для поддержания необходимой температуры используется система водяного отопления. Эта система надежна в эксплуатации и обеспечивает возможность регулирования температуры в широких пределах. При устройстве системы вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении лаборатории необходимо соблюдать определенные требования пожарной безопасности. В зимнее время в помещении необходимо предусмотреть систему отопления. Она должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

По защите исследователя от действия вредного фактора отклонения показателей микроклимата создаются микроклиматические условия отоплением, обменной вентиляцией и кондиционированием воздуха согласно [28, 29].

1.2 Шум

Превышение уровня шума возникает при работе механических и электромеханических изделий.

Для оценивания шумовой обстановки допускается использовать числовую характеристику, называемую уровнем звука (измеряется в дБ). В соответствии с [30] допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, составляет 75 дБ. Зоны с уровнем звука 80 дБ должны быть обозначены знаками безопасности согласно [31].

В лабораторной аудитории 248 основными источниками шума являются кондиционер, компьютеры (охлаждение внутри системного блока, оптические приводы DVD-ROM).

В соответствии со спецификацией на компьютер DNS Office XL, уровень шума блока питания компьютера составляет 5-10 дБ, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15-20 дБ, остальные элементы охлаждения являются пассивными и их уровень шума не учитывается. Шум, вызываемый работой оптических приводов, также не учитывается, так как они используются в работе незначительно малое время.

В рассматриваемый лабораторной аудитории дополнительная звукоизоляция не требуется, так как предельное значение уровня шума не достигается.

Для профилактики возникновения вредных шумов следует регулярно осуществлять осмотр системных блоков компьютеров (очистка от пыли и смазывание движущихся частей охлаждающих установок, замена излишне шумных комплектующих).

Защита от повышенных уровней шума осуществляется методами его снижения в источнике образования и на пути распространения, устройством

экранов и звукопоглощающих облицовок, средствами индивидуальной защиты согласно [30, 31].

1.3 Освещение

Недостаточная освещенность рабочей зоны также считается одним из факторов, влияющих на работоспособность человека. Для промышленных предприятий оптимальная освещенность территории и помещений является важной и непростой технической задачей, решение которой обеспечивает нормальные гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные источники света и их проектирование создают условия для производственного труда, корректности выполнения технологических операций, соблюдения правил и техники безопасности.

Главной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

Внутри помещений по способу размещения светильников и распределению освещенности различают следующие системы искусственного освещения: общее и комбинированное.

Общим называется освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения, как занятую оборудованием или рабочими местами, так и вспомогательную. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное общее освещение. При общем равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая тем самым одинаковую освещенность всего помещения. Оно применяется, как правило, когда расположение рабочих зон при проектировании неизвестно либо при гибкой планировке. При общем локализованном освещении светильники размещают с учетом расположения технологического оборудования, создавая на отдельных поверхностях требуемый уровень освещения.

Комбинированная система освещения состоит из общего и местного освещения. Общее освещение предназначено для освещения проходов и

участков, где работы не производятся, а также для выравнивания яркости в поле зрения работающих. Местное освещение обеспечивается светильниками, располагаемыми непосредственно на рабочих местах. Ему следует отдавать предпочтение, если в нескольких рабочих зонах помещения должны решаться различные зрительные задачи и поэтому для них требуются различные уровни освещенности. Оно также необходимо, когда рабочие места территориально отдалены друг от друга. При этом следует иметь в виду, что устройство только местного освещения недопустимо, так как оно создает большую разность освещенности рабочих поверхностей и окружающего пространства, что неблагоприятно сказывается на зрении [21].

При учете особенностей процесса работ на компьютере допускается применение системы общего равномерно освещения.

Для общего освещения применяются газоразрядные лампы: дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ). Определим необходимое количество источников света для полного освещения аудиторного помещения с рабочим компьютером люминесцентными потолочными светильниками.

Световой поток для люминесцентных ламп, мощностью 56 Вт:

$$F = Ra \cdot P, \quad (5.1)$$

где $Ra = 80 \text{ Лм/Вт}$ – минимальный индекс цветопередачи для люминесцентной лампы.

$$F = 80 \cdot 56 = 4480 \text{ Лм.}$$

Необходимое количество ламп для освещения лабораторной аудитории:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot z \cdot k}{K \cdot F \cdot n}, \quad (5.2)$$

где E – освещенность, Лк (при системе общего освещения $E = 300 \text{ Лк}$);

K – переходный коэффициент, 4,5;

n – коэффициент использования светового потока осветительной установки, 45 %;

k – коэффициент запаса, 4,5;

S – площадь освещаемого помещения, 121 м²;

z – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность освещения, 0.9.

$$N = \frac{300 \cdot 121 \cdot 0.9 \cdot 4.5}{4.5 \cdot 4480 \cdot 0.45} = 16,2 \text{ шт.} \quad (5.3)$$

Расчитанное значение количества светильников округляем в большую сторону до целого числа. Получаем, что для надлежащего освещения аудитории необходимо 17 светильников.

Для защиты от недостаточной освещенности рабочей зоны естественное освещение по своему спектру является наиболее приемлемым, но не всегда его оказывается достаточно. Это связано во многом с режимом работы. Обычно рекомендуется применять общее и комбинированное освещение. Нормы освещенности рабочего места соответствуют [21].

1.4 Электромагнитные поля

Основным вредным фактором при использовании ЭВМ является электромагнитное излучение от составляющих частей компьютера. Нормы вредных допустимых уровней (ВДУ) электромагнитного излучения ЭВМ установлены в документе [32], которые показаны в таблице 21

Распространение электромагнитного поля (ЭМП) происходит с помощью электромагнитных волн, которые в свою очередь излучают заряженные частицы, молекулы и атомы. Вред электромагнитного излучения официально доказан и подтвержден соответствующими исследованиями ученых, поэтому по мере возможности нужно ограничивать его влияние на организм человека.

Таблица 21 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряжённость электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

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 [33].

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.

В указанной лаборатории излучение соответствуют нормам [32, 33].

1.5 Пожаробезопасность

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д в соответствии с [22].

Рассматриваемое помещение относится к категории В, так как в нем содержатся твердые горючие вещества в холодном состоянии. Возможные причины возгорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоках питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности.

В целях снижения риска возникновения пожара и минимизации возможного ущерба производятся профилактические мероприятия, которые подразделяются на организационно-технические, эксплуатационные и режимные. Организационно-технические мероприятия заключаются в проведении регулярных инструктажей сотрудников ответственным за пожарную безопасность, обучении сотрудников надлежащей эксплуатации оборудования и необходимым действиям в случае возникновения пожара, паспортизацию веществ, материалов и изделий в части обеспечения пожарной безопасности, изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности [23]. К эксплуатационным мероприятиям относят профилактические осмотры оборудования. Мероприятия режимного характера включают установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- содержание помещений в соответствии с требованиями пожарной безопасности;
- надлежащая эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электропитания, контроль нагрева оборудования);
- обучение производственного персонала правилам пожарной безопасности;
- наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы. Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара. Согласно требованиям пожарной безопасности [22, 23], на этаже находится 2 огнетушителя ОПЗ (огнетушители переносные порошковые), лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

1.6 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества согласно [24]. Электрический ток, проходя через тело человека, производит тепловое, химическое и биологическое воздействие, тем самым нарушая нормальную жизнедеятельность. Работники, принимаемые для выполнения работ в электроустановках, должны иметь профессиональную подготовку, соответствующую характеру работы.

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или

источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА. Кроме того, на установках высокого напряжения возможен удар электрическим током без прикосновения к токоведущим элементам, в результате утечки тока или пробоя воздушного промежутка с образованием электродуги.

В рамках текущей работы не производились контакты с открытыми источниками электрического тока. Ток, протекающий в компьютерной периферии (компьютерная мышь, клавиатура), не представляет существенной опасности для здоровья человека. Согласно классификации, данная лаборатория подходит под помещения 1 класса, в котором рабочие напряжения не превышают 1 000 В [24, 25].

1.7 Радиационная безопасность

Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне. К опасным и вредным производственным факторам, связанным с повышенным уровнем ионизирующих излучений, относят следующие виды излучений [28]:

а) коротковолновое электромагнитное излучение (потoki фотонов высоких энергий) - рентгеновское излучением и гамма-излучение;

б) потоки частиц:

– бета-частиц (электронов и позитронов);

– альфа-частиц (ядер атома гелия-4);

– нейтронов;

– протонов, других ионов, мюонов и др.;

– осколков деления (тяжелых ионов, возникающих при делении ядер);

в) излучение, вызванное радиоактивным загрязнением (выше природного фона), в том числе загрязнением техногенными радионуклидами:

– радиоактивное загрязнение воздуха рабочей зоны (из-за наличия радиоактивных газов радона, торона, актинона, продуктов их радиоактивного распада, аэрозолей, содержащих радионуклиды);

– радиоактивное загрязнение поверхностей и материалов производственной среды, включая средства защиты работающих и их кожные покровы.

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и от индивидуальных особенностей организма. Вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. Любой вид ионизирующего излучения вызывает биологические изменения в организме как при внешнем облучении, когда источник облучения находится вне организма, так и при внутреннем облучении, когда радиоактивные вещества попадают внутрь организма.

В ходе выполнения научного исследования, предполагающего теоретические расчеты с использованием суперкомпьютера и не более, работы с источниками ионизирующего излучения не осуществлялись [28].

2 Аварийные ситуации

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [34]. Есть два вида чрезвычайных ситуаций:

- техногенная;
- природная.

К техногенным ЧС можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ. К природным ЧС относятся природные катаклизмы. Наиболее вероятной техногенной ЧС являются пожары.

К опасностям несчастного случая относится внезапный и неуправляемый источник энергии: двигающийся предмет, неуправляемое движение или энергия.

Рассмотрим возможные аварийные ситуации в аудиторной лаборатории № 248 учебного корпуса № 11 ТПУ, а именно:

- возникновение пожара;
- удар электрическим током;
- падение с высоты собственного роста;
- падение с лестницы.

Мероприятия по предотвращению и ликвидации вышеуказанных аварийных ситуаций представлены в таблице 22

Таблица 22 – Аварийные ситуации, мероприятия по предотвращению ЧС и ликвидации последствий аварийной ситуации

№	Аварийная ситуация	Мероприятия по предотвращению ЧС	Мероприятия по ликвидации последствий аварийной ситуации
1	Падение с высоты соответственно го роста	1. Содержание помещения в надлежащем порядке. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Своевременное проведение инструктажа.	1. Осмотреть или опросить пострадавшего; 2. если необходимо – вызвать скорую помощь; 3. остановить кровотечение, если оно имеется; 4. если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.

Продолжение таблицы 22

2	Падение с лестницы	<p>1. Покрытие ступенек лестницы антискользящим покрытием.</p> <p>2. Своевременное проведение инструктажа.</p>	<p>1. Вызвать скорую помощь;</p> <p>2. остановить кровотечение, если оно имеется;</p> <p>3. если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.</p>
3	Удар электрическим током	<p>1. Заземление всех электроустановок.</p> <p>2. Ограничение рабочего пространства.</p> <p>3. Обеспечение недоступности токоведущих частей аппаратуры.</p> <p>4. Своевременное проведение инструктажа.</p>	<p>1. Быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока [26];</p> <p>2. вызвать скорую помощь;</p> <p>3. если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, его следует удобно уложить, расстегнуть стесняющую одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой;</p> <p>4. пострадавшему надо дать понюхать нашатырный спирт, сбрызнуть лицо водой, растереть и согреть тело;</p> <p>5. при отсутствии дыхания нужно немедленно делать искусственное дыхание и массаж сердца.</p>
4	Пожар	<p>1. Своевременное проведение инструктажа.</p> <p>2. Установление средств автоматического пожаротушения в помещениях.</p> <p>3. Установка датчиков дыма и огня.</p> <p>4. Обеспечение путей эвакуации и поддержание их в надлежащем состоянии.</p> <p>4. Контроль работы электроприборов.</p>	<p>1. Обесточить помещение, прекратить поступление воздуха;</p> <p>2. немедленно сообщить о пожаре дежурному или на пост охраны;</p> <p>3. по возможности принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и спасению материальных ценностей.</p>

В данном разделе рассмотрены потенциальные аварийные ситуации, которые могут возникнуть при работе в лабораторной аудитории № 248 учебного корпуса № 11. Рассмотрены мероприятия по предотвращению и ликвидации последствий этих ситуаций, согласно [26, 34].

3 Выводы по главе

В главе рассмотрены вредные и опасные факторы:

- микроклимат [28, 29];
- шум [20, 30];
- освещенность [21];
- пожароопасность [22, 23];
- электробезопасность [24, 25];
- электромагнитное излучение [32, 33];
- радиационная безопасность [27].

Также рассмотрены причины возникновения и средства защиты, чрезвычайные и аварийные ситуации, меры их предупреждения, меры ликвидации их последствий. Отдельно были рассмотрена радиационная безопасность работы и потенциальная опасность со стороны электромагнитного излучения.

Рассматриваемая аудитория отнесена к классу В по пожароопасности[22] и к 1 по электробезопасности[24,25].

Заклучение

С целью калибровки электромагнитного калориметра *ECAL* эксперимента *NA64*, а также получения зависимости предельного энергетического разрешения калориметра от энергии пучка было осуществлено численное моделирование с помощью пакета *GEANT4*. Помимо этого проводилось изучение энергетических утечек.

В результате моделирования энергетического разрешения выяснилось, что зависимость разрешения от энергии иницирующей частицы содержит постоянный член, неучтённый в моделях работы [16]. Это можно объяснить неустранимыми энергетическими утечками в материале калориметра или ошибкой округления при суммировании низкоэнергетической компоненты спектра. С увеличением размеров калориметра, энергия поглощенная в калориметре увеличивается, однако недостаток энергии около 200 МэВ не удастся снизить таким образом. Предположительно, его формируют слабо взаимодействующие частицы, рождающиеся в фотоядерных реакциях.

Рассматриваемый алгоритм извлечения калибровочных коэффициентов предполагает параметризацию электромагнитного ливня, развивающегося в детекторе. Для этого было осуществлено моделирование, после чего полученный профиль ливня аппроксимировался факторизованной функцией, полученной в приближении гомогенного калориметра. После применения калибровки на экспериментальных данных, был получен результат, свидетельствующий о значительной количественной ошибке в калибровке, однако в дальнейшем планируется учесть рассмотренные в работе эффекты связанные с анизотропией излучения в веществе калориметра, конверсией типов частиц и светосбором с целью повышения точности реконструкции.

Литература

1. Bertone G., Hooper D. History of dark matter //Reviews of Modern Physics. – 2018. – Т. 90. – №. 4. – С. 045002.
2. Bednyakov V. A., Klapdor-Kleingrothaus H. V. Direct search for dark matter—striking the balance—and the future //Physics of Particles and Nuclei. – 2009. – Т. 40. – №. 5. – С. 583-611.
3. Bjorken J. D. et al. New fixed-target experiments to search for dark gauge forces //Physical Review D. – 2009. – Т. 80. – №. 7. – С. 075018.
4. Wigmans R., Wigmans R. Calorimetry: Energy measurement in particle physics. –Oxford University Press, 2000. – Т. 107.
5. Adinolfi M. et al. The KLOE electromagnetic calorimeter //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Т. 482. – No. 1-2. – С. 364-386.
6. Gingrich D. M. et al. Performance of a large scale prototype of the ATLAS accordion electromagnetic calorimeter //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1995. – Т. 364. – №. 2. – С. 290-306.
7. Akchurin N. et al. Beam test results from a fine-sampling quartz fiber calorimeter for electron, photon and hadron detection //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Т. 399. – №. 2-3. – С. 202-226.
8. Peigneux J. P. et al. Results from tests on matrices of lead tungstate crystals using high energy beams //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1996. – Т. 378. – №. 3. – С. 410-426.
9. Åkesson T. et al. Performance of the uranium/plastic scintillator calorimeter for the HELIOS experiment at CERN //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1987. – Т. 262. – №. 2-3. – С. 243-263.
10. Cervelli F. et al. A reduced scale em calorimeter prototype for the AMS-02 experiment //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Т. 490. – №. 1-2. – С. 132-139.

11. Aharrouche M. et al. Energy linearity and resolution of the ATLAS electromagnetic barrel calorimeter in an electron test-beam //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Т. 568. – №. 2. – С. 601-623.

12. Ganel O., Wigmans R. On the calibration of longitudinally segmented calorimeter systems //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1998. – Т. 409. – №. 1-3. – С. 621-628.

13. Albrow M. et al. Intercalibration of the longitudinal segments of a calorimeter system //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Т. 487. – №. 3. – С. 381-395.

14. Grindhammer G., Peters S. The parameterized simulation of electromagnetic showers in homogeneous and sampling calorimeters //arXiv preprint hep-ex/0001020. – 2000.

15. Grindhammer G., Rudowicz M., Peters S. The fast simulation of electromagnetic and hadronic showers //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1990. – Т. 290. – No. 2-3. – С. 469-488.

16. Del Peso J., Ros E. On the energy resolution of electromagnetic sampling calorimeters //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1989. – Т. 276. – №. 3. – С. 456-467.

17. Galassi M. et al. GNU scientific library //Reference Manual. Edition 1.4, for GSL Version 1.4. – 2003.

18. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071/> (дата обращения: 14.02.21)

19. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях Режим доступа:

<http://docs.cntd.ru/document/1200003003> (дата обращения: 15.02.21)

20. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением № 1) Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200291> (дата обращения: 15.02.21)

21. СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение (с Изменением № 1) Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026> (дата обращения: 15.02.21)

22. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643). [Электронный ресурс]. Доступ из сборника НСИС ПБ. –2011. – № 2 (45).

23. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения: 03.03.2021)

24. ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200278> (дата обращения: 18.02.21)

25. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность Режим доступа: <https://beta.docs.cntd.ru/document/1200161238> (дата обращения: 19.02.21)

26. ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200017996> (дата обращения: 05.03.2021)

27. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 Режим доступа: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 21.02.21)

28. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения: 15.02.21)

29. СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения:

15.02.21)

30. ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200292> (дата обращения: 15.02.21)

31. ГОСТ 12.4.026-76* Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные и знаки безопасности Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003391> (дата обращения: 15.02.21)

32. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901865498> (дата обращения: 16.02.21)

33. ГОСТ 12.1.006-84 Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200272> (дата обращения: 16.02.21)

34. ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200139176> (дата обращения: 11.03.2021)