

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

---

Институт: Энергетический  
Направление подготовки: 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»  
Кафедра: Электроэнергетических систем

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Импульсная электрическая прочность полимерной изоляции в зависимости от объёма</b> УДК 621.315.616.9: 537.226.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4A	Денисова Сабина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭЭС	Важов В.Ф.	Д.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры менеджмента	Потехина Н. В.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Извеков В. Н.	К.Т.Н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭЭС	Сулайманов А. О.	К.Т.Н.		

Томск – 2016 г.

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

---

Институт – Энергетический  
Направление подготовки – 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»  
Уровень образования – Магистратура  
Кафедра – «Электроэнергетических систем»  
Период выполнения – осенний/весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1.06.16
--	---------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
24.12.14	Обзор отечественной литературы	15
11.03.15	Методика проведения исследований	5
30.04.16	Экспериментальная часть	20
30.05.16	Обсуждение результатов	5
01.06.16	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
03.06.16	Социальная ответственность	20
04.06.16	Заключение	5
06.06.16	Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке	10

**Составил преподаватель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭЭС	Важов В.Ф.	д.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭЭС	Сулайманов А. О.	к.т.н.		

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

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки (специальность) 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
Кафедра Электротехнических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ЭКМ  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Сулайманов А. О.  
(Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM4A	Денисовой Сабине Сергеевне

Тема работы:

Импульсная электрическая прочность полимерной изоляции в зависимости от объёма	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.01.2016, №432/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1.06.16
--	---------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	<b>Вероятностное распределение Вейбулла;</b> электрических полей пространственных зарядов в объёме кабельной изоляции, работающей на высоком напряжении;
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<b>1. Методы определения частичных разрядов;</b> <b>2. Обоснование математической модели;</b> <b>3. Выбор образцов для испытания;</b> <b>4. Методика эксперимента;</b> <b>5. Обсуждение результатов;</b>

	<b>6. Заключение.</b>
<b>Перечень графического материала</b>	<b>Презентация в Power Point.</b>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<b>Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	<b>Потехина Н. В.</b>
<b>Социальная ответственность</b>	<b>Извеков В. Н.</b>
<b>Приложение А</b>	<b>Воробьева В. В.</b>
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
<b>1. Introduction.</b>	
<b>2. Measuring methods in the recommended protocol</b>	
<b>3. Recommended protocol: initial proposal and its limits..</b>	
<b>4. Recommended protocol: new proposal.</b>	
<b>5. Conclusion.</b>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	<b>30.09.2015</b>
---	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент кафедры ЭЭС	Важов В.Ф.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM4A	Денисова Сабина Сергеевна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM4A	Денисовой Сабине Сергеевне

<b>Институт</b>	Энергетический	<b>Кафедра</b>	Электроэнергетические системы и сети
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Высоковольтная техника в электроэнергетических системах

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и Ресурсосбережение»:</b>	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования(НИИ): Материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>В разработке участвовали руководитель и магистрант.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 27,1 %.</i>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ конкурентных технических решений Функционально-стоимостной анализ SWOT анализ</i>
2. <i>Планирование этапов и выполнения работ по НИР (определение состава работы, определение действующих лиц, установление длительности и трудоемкости работы)</i>	<i>Планирование научно-исследовательских работ, определение действующих лиц, длительности и трудоемкости работ.</i>
3. <i>Расчет бюджета для научно-технического исследования</i>	<i>Определение затрат НИИ</i>
4. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Оценка целесообразности и эффективности научного исследования.</i>
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</li> <li>2. Анализ стоимости функций выполняемых объектом</li> <li>3. SWOT-анализ</li> <li>4. Диаграмма Ганта</li> <li>5. Бюджет затрат НИИ</li> </ol>	
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель	Потехина Н. В.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM4A	Денисова Сабина Сергеевна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 120 страниц, 22 рисунков, 24 таблиц, 44 источников и 2 приложений.

Ключевые слова: полимерный диэлектрик, электрическая прочность, объём изоляции, вероятностное распределение.

В работе получены зависимости одноимпульсной электрической прочности от объёма полимерной изоляции, которые обработаны с использованием вероятностного распределения Вейбулла, что дает возможность рассчитывать электрическую прочность высоковольтных изоляционных устройств для заданной вероятности пробоя. Варьирование величины объёмов изоляции происходит в пределах трех порядков, что позволяет прогнозировать результаты в широком диапазоне изменения объёмов.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013 в соответствии с ГОСТ Р 1.5-2004, графический материал – построение конструктивного чертежа в программе Microsoft Visio. Работа представлена в распечатанном виде на листах формата А4 и на диске CD R (в конверте на обороте обложки).

## Содержание

Введение.....	8
Глава 1. Обзор литературы.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.1. Обоснование математической модели, для описания статистических закономерностей отказа.....	14
Глава 2. Методика проведения исследований .....	22
2.1. Обоснование и выбор материалов для образцов, их формы и размеров.....	22
2.2. Генератор импульсных напряжений для одноимпульсных испытаний .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.3. Методика отдноимпульсных испытаний.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.4. Оценка погрешности измерений.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.5. Методика обработки результатов.....	29
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1.1. Анализ стоимости функций выполняемых объектом.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1.2. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и её анализ .....	34
4.2. SWOT-анализ.....	36
4.3. План проекта.....	37
4.4. Расчет бюджета для научно-технического исследования. Расчёт материальных затрат НТИ .....	38
4.5. Основная заработная плата исполнителей системы.....	40
4.5.1. Дополнительная заработная плата исполнителей системы.....	41
4.5.2. Отчисления во внебюджетные фонды(страховые отчисления).....	42
4.5.3. Накладные расходы .....	42
4.5.4. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского объекта.....	43
4.6. Ресурсоэффективность .....	44

## Введение

Постоянный рост требований к параметрам высоковольтных импульсов налагает особо жесткие условия на режимы работы изоляции. Повышение её рабочих градиентов зачастую диктуется не только экономическими, но и принципиальными соображениями, так как получение импульсов с «предельными» параметрами невозможно без снижения паразитных параметров элементов установок, что достигается, в частности, сокращением габаритов изоляции. Вместе с этим остро ставится проблема повышения эксплуатационной надежности и долговечности импульсных устройств, что также сводится к решению вопроса выбора режима работы высоковольтной изоляции.

Использование твердых полимерных диэлектриков в качестве изоляции электрофизических установок (ЭФУ) позволяет в достаточной мере удовлетворить предъявляемые к ней требования. Обширные сведения об электрической прочности и долговечности твердых полимеров получены преимущественно для промышленных типов пленок и монолитной изоляции толщиной  $10^{-3}$  м и менее.

Для решения перечисленных выше задач важное методологическое значение имеет выбор способа экспрессного получения оценок электрической прочности изоляции.

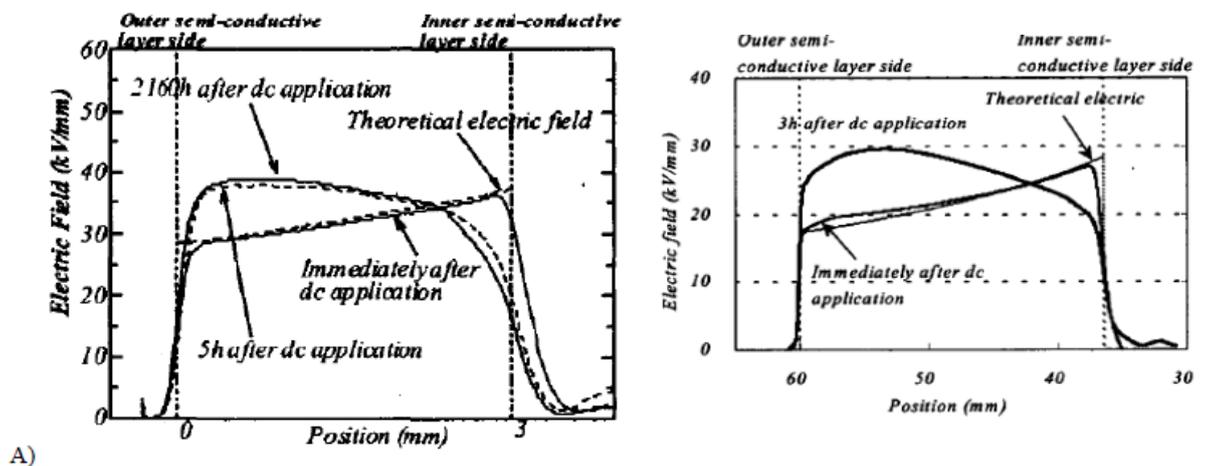
Непроходящий интерес учёных к проблемам качества и электрической прочности твёрдой полимерной изоляции иллюстрируется результатами исследований, представленными в работе.

Здесь, приведены результаты измерений электрических полей пространственных зарядов в объёме кабельной изоляции, работающей на

высоком напряжении, что непосредственно влияет на электрическую прочность и старение изоляции.

Традиционно для кабелей HVDC используется бумажно-масляная изоляция, в особенности бумажная изоляция, пропитанная нестекающей массой (MIND или MI типа), которые служат для кабелей с номинальным напряжением и мощностью до 500 кВ и 1000 МВт. Если говорить о HVDC кабелях с экструдированной изоляцией, то они являются относительно новыми. Тем не менее, в последнее время, количество установленных HVDC с использованием кабелей с экструдированно-полимерной изоляцией увеличилось, так как полимерные изолированные кабели имеют преимущества, в сравнении с остальными. Основным преимуществом является то, что масло не используется в изоляции, и максимально допустимая температура проводника при нормальной работе выше. Напряжение постоянного тока до 320 кВ и мощностью до 1 ГВт являются коммерчески доступными. Кроме того, в декабре 2012 года Хоккайдо Хонсю HVDC экструдированная биполярная кабельная связь была введена в эксплуатацию, показывая пропускную способность 600 МВт и номинальное напряжение 250 кВ. Этот экструдированный кабель HVDC также является первым кабелем, который может быть использован при температуре 90 °С.

Хорошо известно, что экструдированная изоляция для кабелей высокого напряжения постоянного тока зависит от захваченного пространственного заряда.



## Рисунок 1 - Электрическое поле

Конечно, измерение пространственного заряда полноразмерных кабелей не легкая задача, из-за экспериментальных трудностей. Результаты измерений на полноразмерных HVDC экструдированных кабелях выполнены следующим образом:

1. на 250 кВ кабеля из сшитого полиэтилена изоляцией, 12 м длиной, с поперечным сечением проводника  $800 \text{ мм}^2$  и толщиной изоляции 20 мм, поляризованный 500 кВ ( в течение трех часов максимум по каждой полярности) при высоких перепадах температуры (от  $85^\circ \text{ C}$  на проводнике, до  $5-7^\circ \text{ C}$  на открытом воздухе, где заложены кабели);

2. на изолированном кабеле из сшитого полиэтилена с напряжением 500 кВ и с поперечным сечением проводника  $3000 \text{ мм}^2$ , с толщиной изоляции 23 мм, поляризованный при напряжении 500 кВ с температурным градиентом.

Так же находит свое применение метод TSM (Thermal Step Method), который предназначен для кабелей с толщиной в диапазоне от 2 до 20 мм.

Между тем, измерения пространственного заряда в настоящее время, выполняется после предварительного испытания на соответствие техническим условиям (PQ) и типового испытания (ТТ) продолжительности включения. В лабораториях различных производителей, по всему миру, предлагают отличную возможность для оценки пространственного заряда и профиля электрического поля, в изоляции стенок полноразмерных HVDC экструдированных кабелей.

К сожалению, ни стандартная процедура, ни пределы пространства заряда все еще не утверждены единым образом. Следовательно, эти измерения пространственного заряда зависят от проекта-соглашения между производителями кабеля и его клиентами. В этом отношении TERNA, итальянская система электропередачи (TSO), была первой в мире, кто включил измерения пространственного заряда во внутреннюю спецификацию, как метод, для получения доступа к распределению электрического поля в изоляции стенок экструдированного кабеля.

Цель заключается в создании и обеспечении научно-технической базы, которая может служить в качестве справочника для таких измерений. Соответственно деятельность, осуществляемая до сих пор ТС, заключается в разработке рекомендуемого протокола для измерения объемных зарядов в натуральную величину HVDC экструдированных кабелей во время циклов нагрузки PQ и ТТ.

Протокол направлен на оценку профиля электрического поля в стенках кабельной изоляции, без учета и проверки соблюдения любого максимально допустимого предела, либо пространственного заряда или электрического поля; на самом деле, как указывалось выше, не существует универсального соглашения об измеряемых пределах пространственного заряда или вспомогательного электрического поля. Но напротив, протокол фокусируется на заряде и поле динамика в период измерения, и в частности, на том, как электрическое поле изменяется во время измерений, и таким образом, изучает изменения на отдельных этапах PQ и ТТ циклов нагрузки для полноразмерных HVDC экструдированных кабелей.

В самом деле, в стадии проектирования распределения электрического поля определяются геометрией кабеля и градиентом температуры в изоляции. Таким образом, конструкция основана на макроскопических параметрах проводимости и диэлектрической проницаемости и их температурной зависимости. Любые нарушение электрического поля будут выявлены только во время измерения пространственного заряда либо после цикла нагрузки PQ и ТТ.

Изменение накопления пространственного заряда может быть признаком процесса старения во время испытания.

По этой причине, начиная с самого первого предложения протокол предписывает, что каждое измерение должно быть осуществлено при условии, что с точки зрения плотности пространственного заряда и профиля электрического поля в стенках изоляции, и что стабилизацию профиля поля следует искать на основе максимальной разницы (в процентах) между

профилем электрического поля на двух последующих измерениях времени  $t_l$  и  $t_m$ .

$$\Delta E_{\max}(t_l - t_m) = \max \left\{ 100 \times \left| \frac{E(t_l, r_k) - E(t_m, r_k)}{E(t_l, r_k)} \right| \right\}, \quad k = 1, \dots, N \quad (1)$$

Предлагаемый протокол в соответствии с первым предложением был успешно применен для измерения пространственного заряда используя либо РЕА или технику TSM и выполняется в лабораториях по всему миру на полноразмерных HVDC кабелях с циклами нагрузки (PQ и TT) для HVDC экструдированных кабелей и имеет важнейшее значение. Протокол оказался успешным.

## Глава 1. Обзор литературы

Разработка проблемы надежности и долговечности электрической изоляции ЭФУ в современной постановке предусматривает, с одной стороны создание корректной физической модели её отказа в широком диапазоне возможных эксплуатационных режимов, глубокую математическую проработку этой модели - с другой [1].

Своеобразие настоящего этапа развития науки заключается в необходимости разработки инженерных методов расчёта изоляционных конструкций высоковольтных импульсных систем взамен существующей практики интуитивного выбора рабочих градиентов изоляции, основанной на овладении опытом технического анализа эксплуатации данных и учёте изученных физических свойств [2].

Длительное воздействие напряжения приводит к необратимым изменениям в изоляции. Их можно назвать старением. Старение под действием напряжения, наряду с другими последствиями, приводит к снижению электрической прочности изоляции [3].

При всех этих разнообразных условиях проявляется одна особенность, свойственная электрическому разряду, а именно: статистический характер этого явления [4].

Установление закона изменения пробивного напряжения с изменением статистики явления поможет во многих случаях выяснить физический характер этого явления. Этот закон имеет, кроме научного, также чисто практический интерес. Совершенно очевидно, что определение пробивного напряжения готовой продукции не может быть сделано достаточно надежно из-за ограниченности числа опытов. Определение этого пробивного напряжения

испытанием моделей или образцов небольших размеров возможно, если известно изменение статистики. С этой проблемой сталкиваются при испытаниях высоковольтных конденсаторов, кабелей, изоляции машин и т.п[4].

Вероятностное исследование включает в себе представление реальной неоднородной совокупности явлений при помощи теоретической совокупности, конечная цель которого – получение количественных характеристик (закономерностей физического состояния). Количественные характеристики – это, своего рода, выражение опасности отказов, как целой конструкции, так и отдельных её элементов в вероятностных терминах[5].

### **1.1. Обоснование математической модели, для описания статистических закономерностей отказа**

Можно выделить модель отказа изоляции, основанной на теории «слабого звена», которая рассматривает элемент, составленный из  $n$  звеньев подобно цепи. Прочность элемента эквивалента прочности звена, отказавшего первым, т.е. определяется законом распределения наименьшей порядковой статистики объёма  $n$ . Согласно теории надежности[6], внезапный или износный характер отказа «слабейшего звена» определяет соответствующий тип функции распределения (ФР) его прочности : экспоненциальное или предельное распределение минимальных членов выборки типа 3 – распределение Вейбулла. Аналитическое выражение последнего в общем виде

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], \quad x \geq \gamma, \quad (1.1)$$

с плотностью распределения

$$\partial_1(x) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{x - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{x - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], \quad x \geq \gamma. \quad (1.2)$$

Тремя параметрами закона Вейбулла являются

$\eta$  -параметр масштаба,

$\beta$  - параметр формы,

$\gamma$  - параметр положения (обычно принимается равной нулю, т.к. прочность изоляции не может быть меньше 0). Тогда (1.1.) может быть записано как

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\eta} \right)^\beta \right]. \quad (1.3.)$$

Закон Вейбулла обладает качеством обобщающей математической модели отказа элемента в теории «слабейшего звена» в силу следующих обстоятельств.

1. Самовоспроизводится для наименьшей порядковой статистики выборки из совокупности  $n$ , распределенной по закону Вейбулла.
2. Как при малом  $n$  (например, число слоев диэлектрика и бумажном конденсаторе), когда отказы распределяются по экспоненциальному закону, так и при большом числе звеньев  $n$  (послойные группы макрорадикалов, между которыми развиваются субмикротрещины [7], распределение минимальных значений прочности которых описывается бета-распределением, неизбежно приводит к распределению Вейбулла, что определяет его как распределение «промежуточной» формы.

Важным следствием экстремального характера электрической прочности является зависимость электрической прочности изоляции от площади и чаще всего от объёма.

Тип ФР, используемой для описания статистических свойств электрической прочности, часто выбирается только из соображений возможно лучшего совпадения с экспериментальными данными в модальной области и удобства применения. Вследствие этого в зависимости от специфики проблем, стоящих перед исследователем, в литературе в разное время рассматривались ФР электрической прочности  $U_{пр}$  самых различных видов. Однако при попытке экстраполировать результаты в область более высокой надежности или

больших площадей изоляции, выбор типа ФР Упр оказывается критичным и поэтому желательно, чтобы он был физически обоснован[8].

Наибольшее распространение среди специалистов, занимающихся надежностью изоляции высоковольтных устройств, получило распределение Вейбулла, поскольку оно является наиболее физически обоснованным для описания экспериментальных результатов как по кратковременной, так и по длительной прочности. Обоснование применимости этого распределения для названных целей дается во многих работах, например[9,10,11]. Анализу параметров этого распределения посвящено всего несколько работ, например [12,13] и в этом смысле возможности применения распределения Вейбулла для практических целей ещё не полностью изучены. Для описания распределения кратковременных пробивных напряженностей ФР Вейбулла имеет вид

$$Q(E_{np}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E_i}{E_e}\right)^\alpha\right] \quad (1.4)$$

$\alpha$  – параметр распределения,

$E_e$  – значение пробивного градиента.

Это вероятностное выражение является основой для расчёта и прогнозирования надежности работы изоляции высоковольтных устройств. При большом значении доверительной вероятности (при малой вероятности отказов) прогнозирование, в принципе, осуществляется по результатам испытаний очень большого числа реальных изделий, что практически неосуществимо. Приемлемым способом оценки является экстраполяция данных ресурсов испытаний ограниченного числа образцов. При этом экстраполяция может быть надежной лишь в том случае, если она основана на корректной статистической модели. Такой моделью в настоящее время являются распределение Вейбулла, которое дает наиболее точные результаты по сравнению с другими типами распределений.

Одним из важных факторов, который необходимо экстраполировать, является объём (площадь, толщина, длина) изоляции. Как правило, экспериментальные результаты получены на образцах, имеющих меньший объём по сравнению с реальными изделиями. Согласно статистической теории экстремальных значений увеличение площади в  $n$  раз приводит к увеличению вероятности встретить ослабленный участок изоляции. Неоднородность материала образца является причиной хорошо известного факта, а именно, зависимости градиента электрического пробоя от размеров (объёма) образцов, подвергаемых воздействию электрического поля.

С помощью методов вероятностного анализа можно перейти к «принципу геометрической эквивалентности», который состоит в экстраполяции результатов, полученных при испытании образцов на весь изоляционный комплекс при известных параметрах распределения вероятности разряда в данном диэлектрике.

Практическая ценность обобщенного закона Вейбулла заключается в возможности получения экспрессных оценок долговечности изоляции и изоляционных конструкций с любым уровнем надежности методом линейных экстраполяций результатов ускоренных испытаний к реальным условиям их эксплуатации. Этому вопросу в литературе уделяется особенно большое внимание. Опубликованные на сегодня результаты свидетельствуют о правомочности применения распределения Вейбулла к описанию распределений пробивных значений прочности [14,15,16] и отказов различных диэлектрических материалов, композиций на их основе [17] и целых конструкций [18], для разных форм полей и воздействующих напряжений.

Распределение Вейбулла является более точным и более удобным в математическом выражении, когда производится экстраполяция экспериментальных результатов на различные объёмы изоляции [11,12,21]:

$$Q(E, \vartheta) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \right) \cdot \left( \frac{E_i}{E_e} \right)^a \right], \quad (1.5)$$

где  $\vartheta$  - текущий объём изоляции;

$\vartheta_0$  - исходный объём изоляции.

Эти зависимости удовлетворительно описываются выражением:

$$E_1 = N^{-\alpha} \cdot E_0, \quad (1.6)$$

где  $\alpha$  - экспериментальная постоянная;

$E_0$ , - исходная напряженность и число импульсов до пробоя для объёма  $\vartheta_0$ .

Эти зависимости в логарифмическом масштабе выражаются прямыми линиями .т.к.

$$\lg E_1 = -\alpha \cdot \lg N + \lg E_0. \quad (1.7)$$

Выражения (1.7) – уравнение прямой линии

$$y = a - bx,$$

где переменными являются  $y = \lg E_1$ .

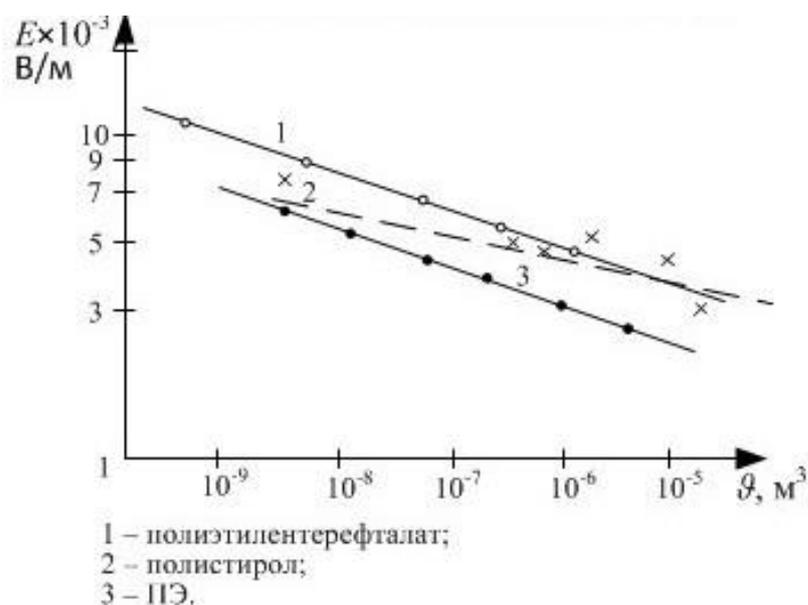


Рисунок 1.1, а – Электрическая прочность полимеров

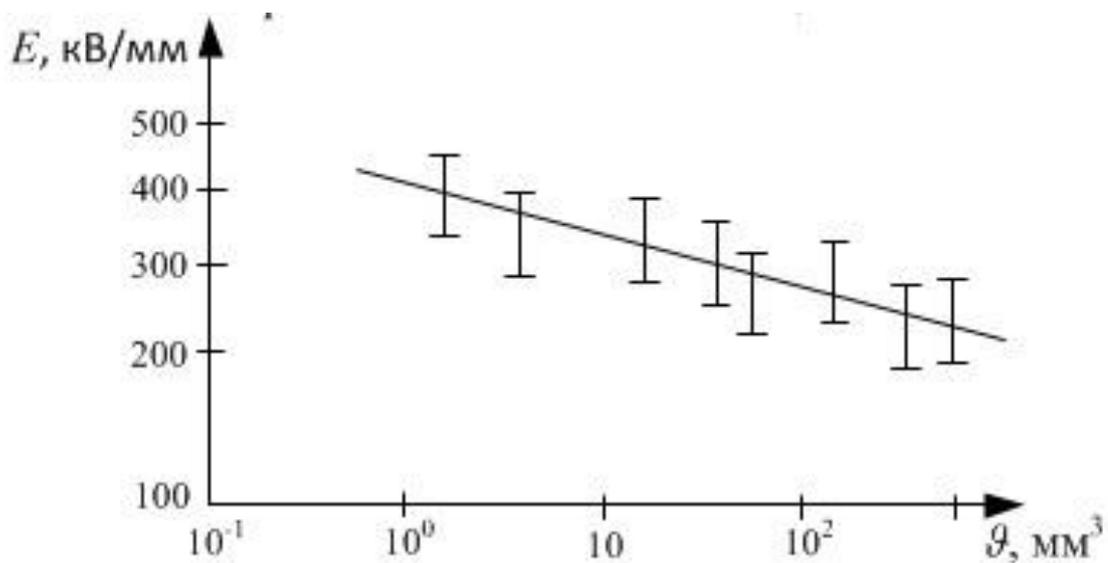


Рисунок 1.1,б – Зависимость импульсной пробивной прочности от объёма изоляции ПЭ

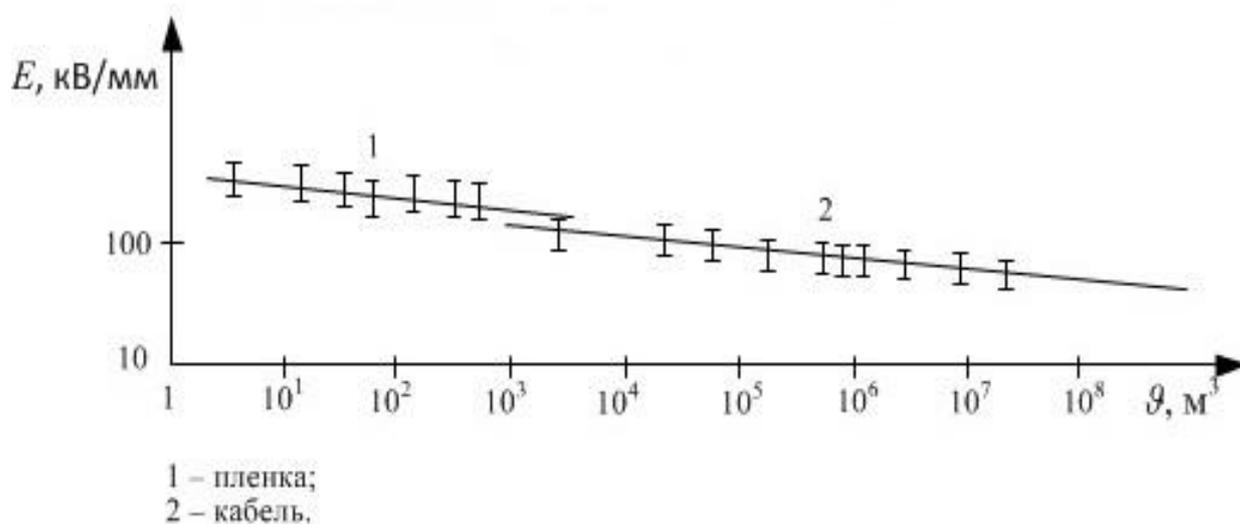
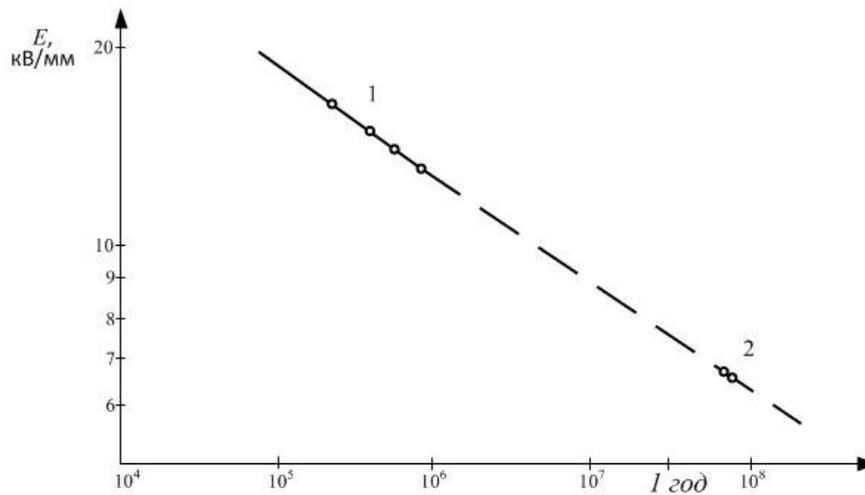


Рисунок 1.1,в – отношение между импульсной пробивной прочностью и объёмом изоляции плёнки и кабеля (ПЭ)



1- Модели кабеля; 2- Реальные кабеля

Рис. 1.2 – Зависимость срока службы от напряженности электрического поля (этиленпропиленовые кабели)

На рис. 1.1 приведены зависимости средних пробивных напряженностей электрического поля от объёма изоляционного материала для разных электроизоляционных конструкций [22,23]. Эти зависимости удовлетворительно описываются выражением (1.6).

Это уравнение в логарифмическом масштабе выражается прямой линией, как (1.7).

Приведенный анализ позволяет сделать ряд выводов:

1. Распределение Вейбулла можно считать достаточно общей моделью для обработки результатов испытаний на пробивную прочность и срок службы.
2. Распределение Вейбулла является единственно устойчивым распределением, т.е. не зависящим от числа элементарных звеньев, рассматриваемых как дефекты или места локального развития повреждения.

Все это позволяет использовать для статистической обработки результатов одноимпульсных испытаний образцов полимерной изоляции распределение Вейбулла.

Целью работы является исследование одноимпульсной электрической прочности полимерного диэлектрика применительно к изоляции высоковольтного импульсного устройства с использованием вероятностно-статистического закона.

## Глава 2. Методика проведения исследований

### 2. 1. Обоснование и выбор материалов для образцов, их формы и размеров

При производстве одноимпульсных испытаний нами допускается достаточно большой разброс образцов по толщине рабочего участка, примерно  $\pm 10\%$ . Ранее проведенные исследования показали, что одноимпульсная пробивная напряженность в таком диапазоне толщины практически не изменяется. Кроме этого, изменение толщины учитывалось при расчёте пробивной напряженности  $E_{пр}$ , для чего была составлена специальная программа.

Нами для исследований использовались образцы из компаунда УП-6-104. Компаунд марки УП -6-104(УП) эластичный, горячего отверждения, состава : 40.в.ч. смолы УП-650Д, 60 в.ч. каучука ПДИ-ЗАК. по 6 в.ч. отвердителей дицианэтилированного и ионоцианэтилированного диэтилентриамин.

Выбранный полимер имеют пространственную, трехмерную организацию молекул (УП, К). В миллиметровом диапазоне толщин указанные материалы обладают достаточно высокой импульсной электрической прочностью [24].

Из эпоксидного компаунда образцы изготавливались отливкой. Для устранения скользящих разрядов, искажающих результаты измерения электрической прочности материалов, электроды с большой кривизной поверхности заглублялись в толщу материала. Электродные системы типа цилиндр-плоскость (Ц-П) острие – плоскость (О-П) и клин-плоскость (К-П) создали слабо- и резконеоднородные поля. Толщина рабочей зоны образцов выбрана в пределах  $(0,5-6) \cdot 10^{-3}$  м, т.е. в том диапазоне, когда применение монолитной изоляции в сильных электрических полях эффективно. Расположение электродов различной конфигурации на образцах приведено на рис 2.1.

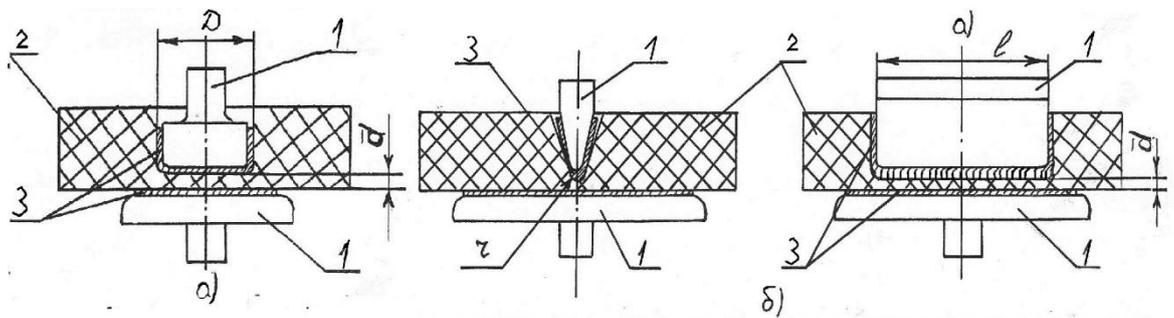


Рис.2.1 - Образцы полимерной изоляции с наложенными электродами типа цилиндр-плоскость (а), клин-плоскость(б).

1- электроды; 2 – испытуемый диэлектрик, 3 – проводящий слой.

Образцы из термореактивного материала УП изготавливались отливкой в специальные формы, на которых жестко закреплялись формующие стрезни со сменными головками (рис. 2.1). Стенки форм перед заливкой эпоксидных компаундов смазывались 15% раствором полиизобутилена в бензине. После испарения на стенках оставалась тонкая пленка, исключая прилипание компаунда к форме. Отверждение заливаемой массы осуществлялось в термошкафах с начальным вакуумированием в течение 30 мин. Для удаления газовых включений при остаточном давлении 665 Па. Режим отверждения образцов из эпоксидного компаунда был следующим при комнатной температуре, УП- 12 ч. При температуре 120 °С с последующим снижением со скоростью 15 °С/ч до комнатной температуры. Размеры заглаблений в образцах для различных электродов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Геометрические размеры образцов и заглаблений в них под электроды

Материал	$d \cdot 10^3$	$h \cdot 10^3$	$\alpha$	$D \cdot 10^3$	$l \cdot 10^3$	$R_l \cdot 10^3$	$R_d \cdot 10^3$	$r \cdot 10^3$	$R \cdot 10^3$
	м	м	Рад.	М	м	м	м	м	м
УП6-104	2,75	10-12	1,05	-	40	-	-	0,06	4,0

Вследствие отклонений тех или иных параметров процесса технологии изготовления образцов, появляется существенный разброс в значениях толщины рабочей зоны, контролируемой индикатором часового типа с

микрометрической шкалой. В целях сведения к минимуму влияния этого разброса на результаты электрической прочности, изготовленные партии образцов подвергались предварительной сортировке таким образом, чтобы максимальная величина отклонения в толщине рабочей зоны образцов относительно среднего размера составляла  $\pm 6\%$ , для всех условий эксперимента. Для электродных систем типа Ц-П и К-П допустимый разброс по толщине рабочей зоны учитывает возможную непараллельность плоскости дна лунки или ее кромки к основанию.

Максимальная напряженность электрического поля в образцах с электродной системой 0-П (К-П) определена из выражения:

$$E_M = \frac{U}{d} \cdot K_H, \quad (2.1)$$

где  $U$  – амплитуда испытательного напряжения, В;

$d$  – среднее значение толщины диэлектрика в данной выборке, М;

$K_H$  – коэффициент неоднородности поля, рассчитываемый по формуле:

$$K_H = \frac{0,8+0,2 \cdot \alpha}{\left(\frac{r}{d}\right)^{\frac{\pi-\alpha}{2 \cdot \pi-\alpha}}} \quad (2.2)$$

здесь:  $\alpha$  – угол раскрытия лунки в образце, рад;

$r$  – радиус скругления дна лунки, м.

В квазиоднородном поле электродной системы Ц-П максимальная напряженность поля в изоляции приравнивается к средней.

Одним из важных факторов, влияющих на электрическую прочность изоляции, является качество контакта материала образца с электродами [25-29]. В наших экспериментах контакт электродов с образцом осуществлялся через проводящее покрытие, что позволяет использовать в качестве электродов любой металл. Для всех условий экспериментов электроды были выполнены из

дюралюминия. Геометрия электродов выполнена с учетом следующих требований:

- не создавать дополнительных механических усилий на дно (кромку) лунки;
- исключать возникновение «краевого эффекта» при испытании образцов.

В соответствии с этими требованиями выбирались радиусы скругления краев электродов, а диаметральные размеры плоских электродов превышали размеры толщин рабочей зоны.

Выбор типа полупроводящего слоя проводился из учета плотности прилегания к поверхности диэлектрика, химической нейтральности к материалам электрода и полимера, устойчивость к длительным испытаниям. Способ нанесения и вид проводящего покрытий должен удовлетворять требованиям дешевизны и технологичности. Наиболее приемлемым, на наш взгляд, является способ нанесения полупроводящего слоя на основе насыщенного при комнатной температуре водного раствора NaCl. К достоинствам способа следует отнести дешевизну, простоту нанесения, слабую растворимость в полимерах, относительно высокую устойчивость электрической проводимости. Насыщенный водный раствор NaCl вносился в лунку образца до заполнения её объёма на 1/3 так, чтобы исключалось образование пузырьков воздуха под электролитом. Острийный электрод своим кончиком погружался в раствор. Со стороны плоского электрода на поверхности образца притиралась пропитанная раствором NaCl фильтрованная бумага размером с плоский электрод, который поджимает её в электродержателе. В случае электродных систем с электродами «цилиндр» и «клин», процедура выполняется в той же последовательности, под электрод в лунку, заполненную раствором NaCl, помещается прокладка из фильтровальной бумаги для лучшего удержания раствора. Объёмное сопротивление пропитанной электролитом прокладки из фильтровальной бумаги перед началом испытаний составляло порядка  $\rho_V = (2 \div 3) \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Все испытания были проведены на образцах из одного материала марки УП6-104 при одной форме и длительности импульсного напряжения. Форма поля, создаваемая электродной системой, представляла собой клин-плоскость (К-П) и цилиндр-плоскость(Ц-П) при разной толщине диэлектрика между электродами. В таблице 2.2 приведены типоразмеры испытываемых образцов, соответствующие им средняя толщина и объём диэлектрика между электродами.

Таблица 2.2 - Размеры образцов

Форма поля	К-П					Ц-П			
	20	40			60	20	30	40	
Длина, диаметр рабочего участка, *10 <sup>-3</sup>	20	40			60	20	30	40	
Толщина рабочего участка, *10 <sup>-3</sup>	2,66	0,64	2,44	5,94	2,68	1,38	1,87	1,0	1,68
Объём рабочего участка, м <sup>3</sup>	5,9*10 <sup>-9</sup>	3,0*10 <sup>-9</sup>	1,2*10 <sup>-8</sup>	2,8*10 <sup>-8</sup>	2,2*10 <sup>-8</sup>	4,3*10 <sup>-7</sup>	1,3*10 <sup>-6</sup>	1,3*10 <sup>-6</sup>	2,3*10 <sup>-6</sup>

## 2.2. Генератор импульсных напряжений для одноимпульсных испытаний.

Источником высокого напряжения являлся пятиступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН) по схеме Аркадьева-Маркса, с односторонней зарядкой до напряжения  $8 \cdot 10^4$  В. Амплитуда импульса могла плавно меняться до  $4 \cdot 10^5$  В. Емкость ГИН в разряде составляла  $10^{-8}$  Ф. Амплитуда и время до пробоя, при испытаниях изоляции на одноимпульсную прочность, регистрировалась на экране осциллографа, подключенного к ГИН через

малоиндуктивный омический делитель напряжения. Схема измерения градуировалась двадцатипятисантиметровым шаровым разрядником в соответствии с ГОСТ 17512-72.

### **2.3. Методика одноимпульсных испытаний**

В практике исследования закономерностей старения изоляции под влиянием тех или иных факторов, ответственных за её износ, широко используются методы оценки состояния изоляции измерением различных характеристик, в т.ч. кратковременной прочности [1,30,31].

Одноимпульсная прочность каждого в отдельности взятого образца определялась из выражения, где за напряжение пробоя принималась амплитуда срезанного на фронте испытательного импульса. Последняя предварительно отстраивалась с небольшим превышением верхней границы разброса значений пробивных напряжений [24].

### **2.4. Оценка погрешности измерений**

При проведении экспериментов в полученные результаты неизбежно входят погрешности, обусловленные несовершенством применяемых методов измерения и измерительной аппаратуры. Рассмотрим возможные ошибки различных измерений. Измерение радиуса округления дна лунки в образцах осуществлялась на микроскопе МИН-8 с абсолютной погрешностью  $10^{-5}$  м при размере  $0,26 \cdot 10^{-3}$  м, которая возрастала до  $6,1 \cdot 10^{-6}$  м при радиусе  $6,0 \cdot 10^{-5}$  м. Максимальная относительная ошибка измеряемых расстояний составляла:

$$\delta_1 = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100\% = \frac{6,1 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 10,2\%. \quad (2.3)$$

Величина угла раскрытия лунок в образцах определялась с точностью 0,035 рад при угле 1,05 рад. Относительная ошибка измерений при этом не превышает:

$$\delta_2 = \frac{0,035}{1,05} \cdot 100\% = 3,3\%. \quad (2.4)$$

Измерение толщины диэлектрика в рабочей зоны образцов проводилось индикатором с точностью до  $10^{-5}$  м при минимальном размере  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Максимальная относительная ошибка этих измерений составляет:

$$\delta'_3 = \frac{10^{-5}}{0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 2\%. \quad (2.5)$$

Допустимое отклонение в толщинах образцов в пределах отдельных партий не превышает  $\delta''_3 = \pm 3\%$ . Тогда результирующая ошибка в измерении толщины изоляции для данных исследований согласно [32] будет

$$\delta_3 = \sqrt{(\delta'_3)^2 + (\delta''_3)^2} = \sqrt{2^2 + 3^2} = 3,6\%. \quad (2.6)$$

Для осциллографа погрешность измерения амплитуды импульсных сигналов длительностью  $0,5 \cdot 10^{-6}$  с составляет не более  $\delta'_4 = 10\%$ . При градуировке емкостного делителя напряжения с осциллографом шаровым разрядником учитывались предъявляемые к методике требования с целью обеспечения максимальной точности измерения [33]. Погрешность измерения при этом не превосходит  $\delta''_4 = 3\%$ . Величина суммарной относительной ошибки при измерении испытательного напряжения составляет:

$$\delta_4 = \sqrt{(\delta'_4)^2 + (\delta''_4)^2} = \sqrt{10^2 + 3^2} = 10,4\%. \quad (2.7)$$

Максимальная (средняя) напряженность электрического поля в изоляции образцов подсчитывалась из выражений (2.1,2.2). Ошибка при определении  $E_M(\bar{E})$  складывалась из погрешностей измерения радиуса округления дна лунки, угла раскрытия лунки, толщины изоляции в рабочей зоне и погрешности измерения напряжения. Максимальное значение этой ошибки составляет

$$\delta_5 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \sqrt{10,2^2 + 3,3^2 + 3,6^2 + 10,4^2} = 15,1\%.$$

Точность описания (отображения на графиках) изучаемых зависимостей определяется точностью оценок параметров отдельных измерений, которая зависит от числа параллельных наблюдений. При величине относительной точности получаемой оценки средних значений наблюдаемой величины  $\delta = 0,95$ , вполне удовлетворяющей требованиям лабораторных исследований [34]. Таким образом, задаваясь объемом выборок для различных условий испытаний в 20-40 образцов, можно полагать, что точность получаемых оценок одно – и многоимпульсной прочности лежит не ниже  $\delta = 0,95$ .

## 2.5. Методика обработки результатов

Значения параметров распределения Вейбулла удобно определять с применением вероятностной бумаги Вейбулла путем графической их оценки [35,36]. Распределение представляется на этой бумаге в виде прямой линии, проведенной через выборочные точки, положение которой зависит от параметра масштаба и характеризуется положительным угловым коэффициентом.

Метод основан на том, что распределение Вейбулла после двойного логарифмирования выражения может быть записано как:

$$\ln\{-\ln[1 - F(x)]\} = \ln \eta^\beta + \beta \ln x . \quad (2.8)$$

Поэтому на вероятностной бумаге с логарифмическим  $\ln x$  и двойным логарифмическим масштабами  $\ln\{-\ln[1 - F(x)]\}$  формула Вейбулла представляется прямой линией.

В данной работе нами применен метод графического отыскания точечных оценок параметров формулы пробивной прочности[36]. Для этого значения наблюдаемых величин располагаются в вариационный ряд, где каждой порядковой статистике присваивается значение частоты (вероятности) появления случайного события (пробоя при соответствующей величине пробивной прочности) по формуле

$$P(E_i, n_i) = \frac{i}{N+1}, \quad (2.9)$$

где  $i$  – порядковый номер наблюдения в вариационном ряду;

$N$  – объём выборки.

Затем выборочные точки наносятся на соответствующую вероятностную бумагу Вейбулла, где по методу наименьших квадратов[36] рассчитывается положение аппроксимирующей линии, состоящей из одного или нескольких прямолинейных участков, относительно которых достигается наибольшая плотность группировки точек.

Истинное значение параметра лежит внутри определенного интервала, называемого доверительным, ширина которого, при одном и том же значении доверительной вероятности, зависит от объёма выборки. В наших исследованиях статистическая значимость расхождений параметров соответствующих меняющимся условиям эксперимента, рассматривалась на уровне доверительной вероятности не ниже 0,9, что удовлетворяет требованиям к лабораторным испытаниям.

Результаты эксперимента наносились на графики Вейбулла, на основании которых определялись параметры распределения Вейбулла  $E_e$  и  $\alpha$ . На рисунках 2.2. и 2.3. приведены примеры распределения пробивных напряженностей  $E_{пр}$ . Данная зависимость является типичной для всех остальных случаев, т.е.

экспериментальные значения  $E_{пр}$  могут быть аппроксимированы на графике Вейбулла одним прямолинейным участком, но с разными параметрами  $E_e$  и  $\alpha$  для разных условий эксперимента. Проверка по критерию согласия  $\chi^2$  соответствия экспериментальных значений аппроксимирующей прямой с доверительной вероятностью  $\beta=0,9$  показывает удовлетворительное согласие [36]. Параметры аппроксимирующей прямой, т.е.  $E_e$  и  $\alpha$ , определялись по методу наименьших квадратов [36]. По результатам таблиц и графиков составлена таблица 2.3, где для разных типоразмеров образцов приведены значения пробивных напряженностей,  $E_{пр}$  для разных вероятностей пробоя  $E_{0,2}$ ;  $E_{0,5}$ ;  $E_{0,9}$ ; параметры Вейбулла  $E_e$  и  $\alpha$ , среднее значение объема рабочего участка для каждой партии образцов  $V$ .

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

### **4.1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности разработанного метода с экономической точки зрения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Важными факторами, влияющими на экономическую привлекательность проекта, в первую очередь являются бюджет, сроки выполнения разработки и техническое качество проекта. Проект должен отвечать всем техническим нормам, выдвигаемым к объекту исследования, но при этом должен быть нацелен на меньшую возможную цену его осуществления.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,087	5	3	3	0,435	0,261	0,261
3. Помехоустойчивость	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
4. Энергоэкономичность	0,094	5	4	3	0,47	0,376	0,282
5. Надежность	0,09	5	5	5	0,45	0,45	0,45
6. Уровень шума	0,066	5	5	5	0,33	0,33	0,33
7. Безопасность	0,087	5	5	5	0,435	0,435	0,435
8. Потребность в ресурсах памяти	0,083	5	5	5	0,415	0,415	0,415
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,08	5	4	3	0,4	0,32	0,24
10. Простота эксплуатации	0,083	5	5	5	0,415	0,415	0,415
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,087	5	5	5	0,435	0,435	0,435
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,07	5	5	5	0,35	0,35	0,35
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,13	5	3	3	0,65	0,39	0,39
2. Уровень проникновения на рынок	0,13	5	3	4	0,65	0,39	0,52
3. Цена	0,14	5	2	3	0,7	0,28	0,42
4. Предполагаемый срок экспл-ции	0,12	5	5	5	0,6	0,6	0,6
5. Послепродажное обслуживание	0,09	4	5	5	0,36	0,45	0,45
6. Финансирование научной разработки	0,13	5	5	5	0,65	0,65	0,65
7. Срок выхода на рынок	0,14	5	5	5	0,7	0,7	0,7
8. Наличие сертификации разработки	0,12	1	5	5	0,12	0,6	0,6
<b>Итого</b>	1						

Анализ конкурентных технических решений:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

#### 4.1.1. Анализ стоимости функций выполняемых объектом

Произведен анализ стоимости функции выполняемых объектом исследования, также рассчитана стоимость функций этапов исследования. Работа включает в себя 4 этапа, такие как – обзор литературы, разработка методики, оценка экспериментальных результатов. Каждый этап рассмотрен индивидуально.

Расчет стоимости функций приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом Исследования

Этапы исследования	Количество деталей на узел	Функция	Себестоимость, руб. за шт.
1 Обзор литературы	1	Изучение литературных источников по теме	1000
2 Разработка методики	1	Изучение методов экстраполяции	20000
3 Оценка экспериментальных результатов	1	Расчёт и построение графиков	40000
4 Подведение итогов	1	-	5000
			66000

#### 4.1.2. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (ФСД) рисунке 4.1.

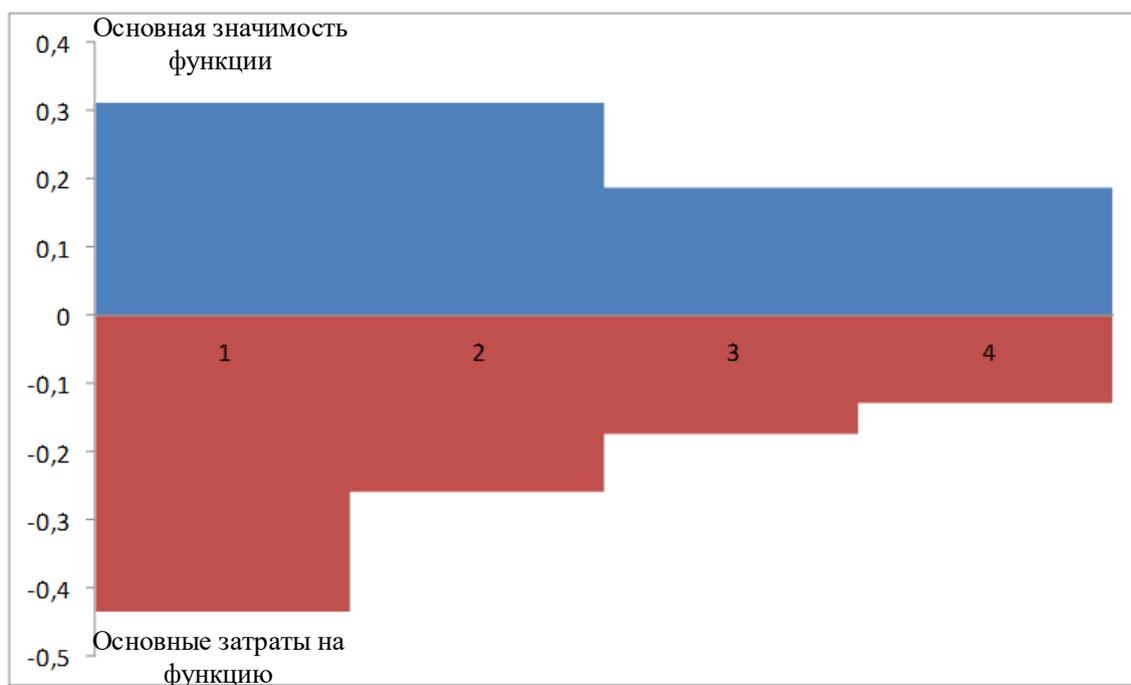


Рисунок 4.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

Анализ приведенной выше ФСД показывает наличие рассогласования по функции 1. Необходимо провести работы по ликвидации данной диспропорции.

По первому пункту мы видим, что затраты не превышают значимости функции, кроме функции 1.

Экономия будет осуществляться за счет применения принципиально новых конструкторских решений, унификации сборочных единиц и деталей, совмещения функций в сборочных единицах и деталях.

В результате проведения анализа выявлено, что снижение затрат на единицу полезного эффекта, достигнуто путем повышения качества при сохранении уровня затрат, а так же уменьшения затрат при сохранении уровня качества, сокращения затрат при обоснованном снижении технических параметров до их функционально необходимого уровня. Повышения качества при некотором, экономически оправданном увеличении затрат.

## 4.2. SWOT-анализ

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

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

<p style="text-align: center;"><b>Сильные стороны</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Повышение производительности труда пользователя.</li><li>2. Экономичность и энергоэффективность технологии.</li><li>3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими подобными технологиями.</li></ol>	<p style="text-align: center;"><b>Слабые стороны</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Недостаточная квалификация кадров по работе с научной разработкой.</li></ol>
<p style="text-align: center;"><b>Возможности</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Использование ресурсной научной базы технических ВУЗов Томска.</li><li>2. Использование информации по аналогичным наработкам в интернете.</li><li>3. Использование информации от предприятия заказчика.</li><li>4. Использование информации выложенной в общий доступ компаниями, занимающимися подобными разработками.</li></ol>	<p style="text-align: center;"><b>Угрозы</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</li><li>2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</li><li>3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</li></ol>

### Решения

Как возможные решения, можно принять повышение квалификации научного персонала, проведение научных мероприятий на привлечение спроса на новые технологии. Поиск частных организация для финансирования объекта. Привлечение к взаимодействию не одного, а нескольких вузов г. Томска, и предприятий на их основе.

### 4.3. План проекта

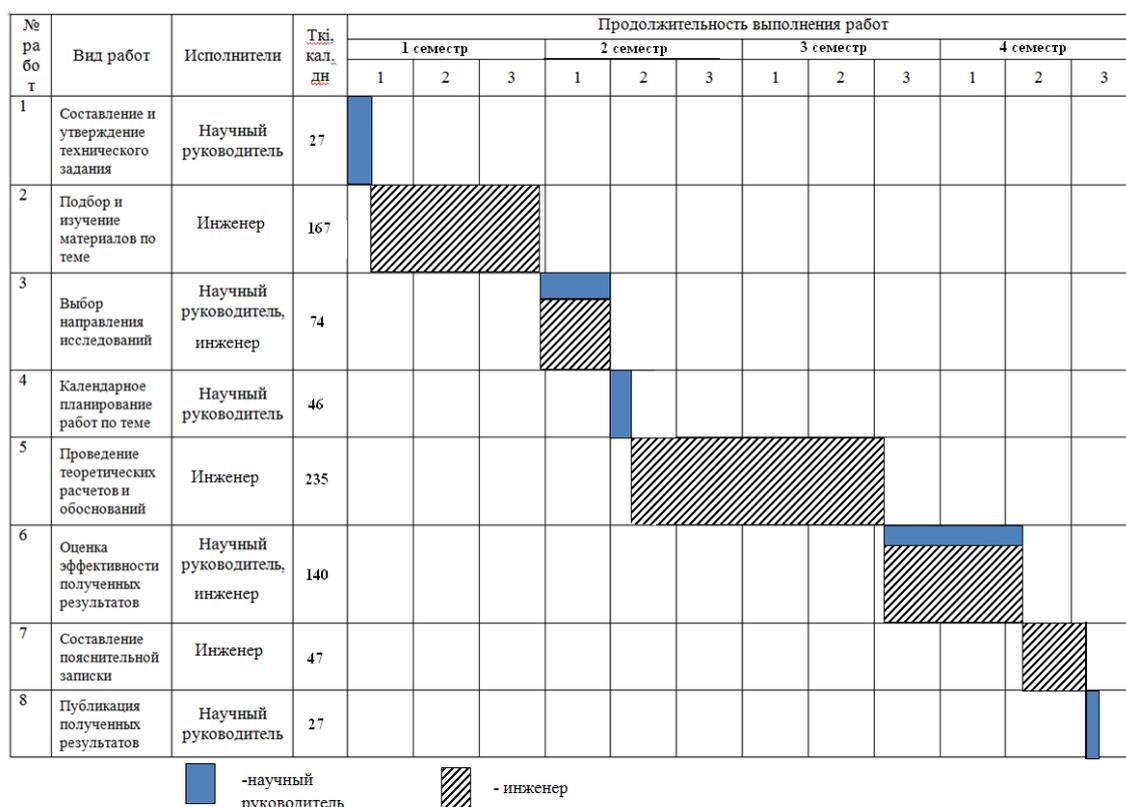
Для выполнения целесообразного и рационального планирования, необходимо разработать календарный план, который включает в себя основные этапы разработки и создания проекта. Разработанный календарный план представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Состав участников
1	Составление и утверждение технического анализа	27	Важов В.Ф., Денисова С.С.
2	Подбор и изучение материалов по теме	167	Важов В.Ф., Денисова С.С.
3	Выбор направления исследований	74	Денисова С.С.
4	Календарное планирование работ по теме	46	Важов В.Ф., Денисова С.С.
5	Проведение теоретических расчётов и обоснований	235	Важов В.Ф., Денисова С.С.
6	Оценка эффективности полученных результатов	140	Важов В.Ф., Денисова С.С.
7	Составление пояснительной записки	47	Важов В.Ф., Денисова С.С.
8	Публикация полученных результатов	27	Важов В.Ф., Денисова С.С.

Для предоставления календарного плана более наглядным образом, используем диаграмму Ганта (таблица 4.5). Диаграмма Ганта представляет собой тип столбчатых диаграмм, которые применяются для иллюстрации графика или плана работ, для различных проектов. Данные диаграммы используются в качестве одного из методов, при планировании проектов. Момент начала и завершения работы на диаграмме определяются концами полос, а протяжённость характеризует длительность работы. Вертикальная ось отображает перечень поставленных задач.

Таблица 4.5 – Диаграмма Ганта



Также, на диаграмме Ганта можно выделить совокупные задачи, отметить проценты завершения, отметить метки ключевых моментов (вехи) и др. Веха представляет собой метку значимого момента в ходе выполнения работ, общую границу двух или более задач. Веха является важным понятием диаграммы Ганта и позволяет наглядным образом подчеркнуть нужду синхронизации в выполнении различных работ.

#### 4.4. Расчет бюджета для научно-технического исследования

##### Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расч i}, \quad (4.2.)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$Ц_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, занесены в таблицу 4.7.

Таблица 4.6.1 – Канцелярские принадлежности

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., руб		Затраты на материалы, (Зм), руб	
		Науч. Рук-ль	Инженер	Науч. Рук-ль	Инженер	Науч. Рук-ль	Инженер
Бумага писчая	Упаковка	2	3	100	100	200	300
Чернила для принтера	Штука	1	2	1500	1500	1500	3000
Ручки гелевые	Штука	2	4	150	150	300	600
Корректор	Штука	-	1	-	100	-	100
Итого						2000	4000

### Расчет затрат на оборудование и программное обеспечение

Таблица 4.6.2 – Оборудование и программное обеспечение

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., руб		Затраты на материалы, (Зм), руб	
		Науч. Рук-ль	Инженер	Науч. Рук-ль	Инженер	Науч. Рук-ль	Инженер
Компьютер	Штука	1	1	20000	25000	23000	28750
Принтер	Штука	1	1	6000	6000	6900	6900
Mathcad	Штука	1	1	7000	7000	8050	8050
Microsoft Word	Штука	1	1	2000	2000	2300	2300
Специализированное ПО	Штука	3	3	8000	8000	9200	9200
Итого						49450	53200

Материальные затраты (оборудование и программное обеспечение, канцелярские принадлежности) на материалы (научн. рук-ль) – 51450,

Материальные затраты (оборудование и программное обеспечение, канцелярские принадлежности) на материалы (инженер) – 57200.

#### 4.5. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.8.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.3.)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{м} = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_{д}) \cdot k_{р}, \quad (4.5.)$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );

$k_{д}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{тс}$ );

$k_{р}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.8:

Таблица 4.8 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$ , руб	$Z_{ли}$ , руб.	Тр, раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Научный руководитель	30000	0,3	0,15	1,3	56550	2692,8	120	323136
Инженер	14584	0,3	0,5	1,3	35100	1350	515	695250
Итого								1018396

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

#### 4.5.1. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (4.6.)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15). Расчет дополнительной заработной платы приведен в таблице 4.10..

#### 4.5.2. 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:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (4.7.)$$

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

Для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015-2016 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	323136	48470,4
Инженер	695250	104287,5
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
<b>Отчисления, руб</b>		
Научный руководитель	100705,3	
Инженер	216674,6	

#### 4.5.3. 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:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 4) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.8.)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Расчет величины накладных расходов приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10. – Накладные расходы

Исполнитель	$Z_{\text{накл}}$ , руб.
Научный руководитель	83801,9
Инженер	171746

#### 4.5.4. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Расчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) 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 табл. 4.11.

Таблица 4.11 – Бюджет затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.		Общая сумма
	Научный руководитель	Инженер	
1. Материальные затраты НИИ	51450	57200	108650
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	323136	695250	1018386
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	48470,4	104287,5	152757,9
4. Отчисления во внебюджетные фонды	100705,3	216674,6	317379,9
5. Накладные расходы	83801,9	171746	255547,9
Бюджет затрат НИИ	607563,6	1245158,1	1852721,7

Суммарный бюджет затрат НИИ составил 1852721,7 рублей.

#### 4.6. Ресурсоэффективность

Ресурсоэффективность автоматизированной системы узла учета тепловой энергии определяется при помощи интегрального критерия ресурсоэффективности, который имеет следующий вид:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, (4.9.)$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Безопасность	0,25	5
2. Надежность	0,25	5
3. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,20	4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,20	4
5. Энергоэкономичность	0,10	3
Итого:	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности для разрабатываемого проекта:

$$I_{pi} = 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,20 \cdot 4 + 0,20 \cdot 4 + 0,10 \cdot 3 = 4,4$$

Проведенная оценка ресурсоэффективности проекта дает достаточно неплохой результат (4,4 из 5), что свидетельствует об эффективности реализации технического проекта.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проекта имеет важное значение при выполнении раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение». Его высокое значение говорит о эффективности использования технического проекта. Высокие баллы безопасности и надежности, удобства в эксплуатации и предполагаемый срок эксплуатации позволяют судить о корректно выполненной разработке системы.

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1) SWOT-анализ дал возможность провести оценки факторов и явлений, влияющих на проект. Были исследованы внешняя и внутренняя среды проекта;

2) при проведении планирования технико-экономического проекта был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и студента, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей;

3) Суммарный бюджет затрат НИИ составил 1852721,7 рублей;

4) проведена оценка ресурсоэффективности проекта (4,4 по 5-бальной шкале), что говорит об эффективности реализации данного технического проекта.

## Список публикаций

1. Денисова С. С. Влияние объёма полимерной изоляции на одноимпульсную электрическую прочность полимеров // XV Российская научная студенческая конференция по физике твердого тела. 17-20 мая 2016, Томск.