

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт Энергетики

На правах рукописи

Селезнёв Дмитрий Александрович

**КОМБИНИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬНОЙ
АРМАТУРЫ НА 110 КВ**

Направление подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника
Специальность 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Научный руководитель:
Д.т.н., доцент, Грешняков Г.В.

Санкт-Петербург
2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и в Научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом кабельном институте ООО «НИИ «Севкабель», г. Санкт-Петербург.

И.о. директора института
энергетики

Зверев Сергей Геннадьевич
К.т.н., доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого» высшей школы электроэнергетических систем

Научный руководитель:

Грешняков Георгий Викторович
д.т.н., доцент ВШВЭ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого»

Рецензент:

Осина Юлия Константиновна
К.т.н., АО «НИИЭФА», начальник лаборатории

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Оглавление

Введение.....	4
1. Основные проблемы в кабельной разделке и существующие методы выравнивания электрического поля	5
2. Моделирование и оптимизация усиливающей изоляции муфты, работа которой основана на комбинированном емкостном методе выравнивания поля	12
3. Регулирование поля в соединительных муфтах, использующих комбинированный резистивно-емкостной принцип выравнивания электрического поля.....	18
3.1. Этапы моделирования.....	19
3.2. Проверка работоспособности модели при отклонении от заданных параметров.....	23
4. Экспериментальная часть исследований	25
4.2. Исследование по увеличению теплопроводности трубки-регулятора.....	25
4.3. Исследование по увеличению диэлектрической проницаемости образцов	29
4.4.Предварительные испытания макета	32
4.4.1. Результаты проведенных испытаний	34
5. Обновлённые конструкции трубки-регулятора.....	36
Основные выводы и результаты работы.....	42
Список литературы	45

Цель работы: повышение эксплуатационной надёжности кабельной арматуры путём разработки перспективного типа усиливающей изоляции муфт (трубка-регулятор или многофункциональный элемент) на напряжение 110 кВ, функционирование которой основано на резистивно-емкостном принципе снижения неравномерности электрического поля в кабельной разделке.

Научные задачи, выполняемые в ходе работы:

- Провести анализ конструкций усиливающей изоляции муфт, используемых в кабельной промышленности, путём численного моделирования электромагнитных и тепловых полей с учётом комбинации воздействующих факторов в специализированном программном комплексе;
- Найти оптимальную конструкцию для нового типа муфт;
- Провести анализ материалов (равномерность распределения наполнителя в матрице, проверка концентрации наполнителя), необходимых для создания элементов конструкции нового усиливающего слоя муфты;
- Разработать макет нового типа муфты (многофункциональный элемент или трубка-регулятор);
- Провести высоковольтные предварительные испытания макета муфты.
- Провести оценку работоспособности разработанных конструкций трубки-регулятора.

Введение

Развитие энергетики влечёт за собой развитие технологий передачи электроэнергии на расстоянии. Кабельная линия – объект, предназначенный для транспортировки электрической энергии. Основным преимуществом кабельных линий является возможность прокладки их под землёй или водой, то есть, не загромождая пространство, где возможно нахождение людей (в городах). В большинстве случаев прокладка кабельных линий осуществляется на значительные расстояния. А, как известно, стандартная строительная длина кабеля, который намотан на барабан, составляет от 250 до 500 метров. Чаще всего до 300 метров. Поэтому требуется использование специальных муфт.

Анализ статистики аварийных случаев на кабельных линиях высокого напряжения показывает, что значительная часть нарушений работы происходит в месте соединения двух кабельных отрезков – в кабельной муфте. Данная статистика объясняется тем, что при разделке кабеля происходит нарушение основной изоляции [1], в результате чего изменяется картина электрического поля, появляется тангенциальная составляющая напряженности электрического поля. Именно она оказывает основное негативное влияние на изоляцию муфты. Так же при усадке муфты, есть вероятность появления ещё одного фактора, негативно влияющего на её работу – это посторонние включения: примеси в теле муфты, которые могут появиться при производстве составляющих; воздушные включения или пыль, которые могут появиться в результате усадки муфты.

Следовательно, качество и срок службы усаженной муфты напрямую зависит от нескольких факторов:

- Качества составляющих, произведенных на производстве;
- Навыков работников, которые занимаются монтажом;
- Сложности процесса монтажа муфты;
- Качества выравнивания электрического поля, то есть снижение величины касательной (тангенциальной) составляющей напряженности электрического поля в разделке.

В связи с этими пунктами, актуальной является проблема разработки нового типа муфт, которые могли бы значительно снизить риски возникновения дефектов при производстве и монтаже муфт, а также улучшить выравнивание поля в разделке кабеля.

Кроме того, актуальность работы обусловлена распоряжением Правительства Российской Федерации от 4 августа 2015 года об импортозамещении в России. На данный момент на территории РФ ограничено производство муфт высокого и сверх высокого напряжения (от 35 кВ и выше), что негативно сказывается на ситуации в целом: во-первых, из-за вероятности полного отсутствия муфт, в случае ввода очередных санкций и отсутствия опыта и средств у промышленников в производстве высоковольтных муфт.

1. Основные проблемы в кабельной разделке и существующие методы выравнивания электрического поля

Разделка кабеля – целенаправленное удаление защитных покровов, оболочек, экранов с соблюдением определённых правил и требований, регламентированных набором документов (ГОСТ, МЭК, инструкции) [2]. Пример разделки кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена представлен на рисунке 1. Разделка предваряет этап монтажа кабельных муфт. Характер распределения электрического поля в поперечном сечении кабеля вне зоны разделки иллюстрируют рис. 2, 3.

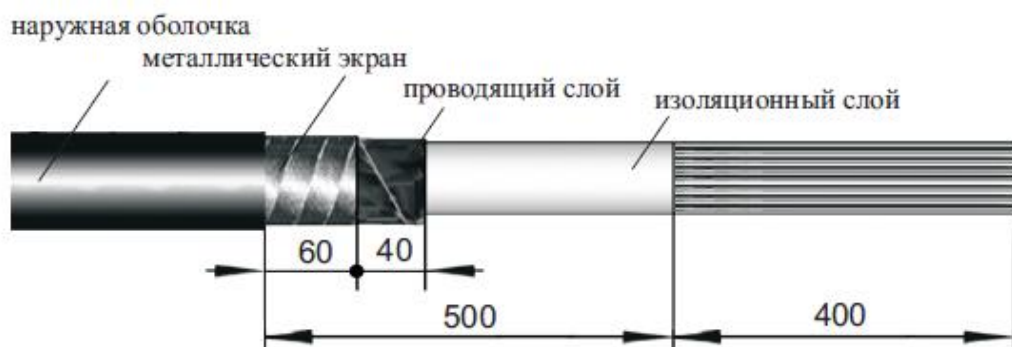


Рисунок 1 Общий вид разделки кабеля с СПЭ изоляцией перед монтажом

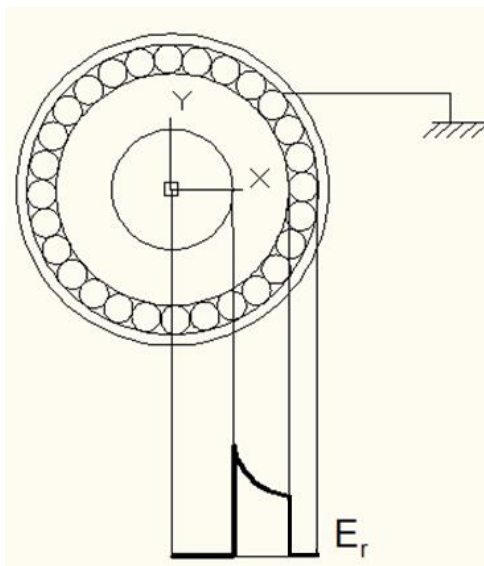


Рисунок 2 Характер распределения напряженности электрического поля по сечению кабеля

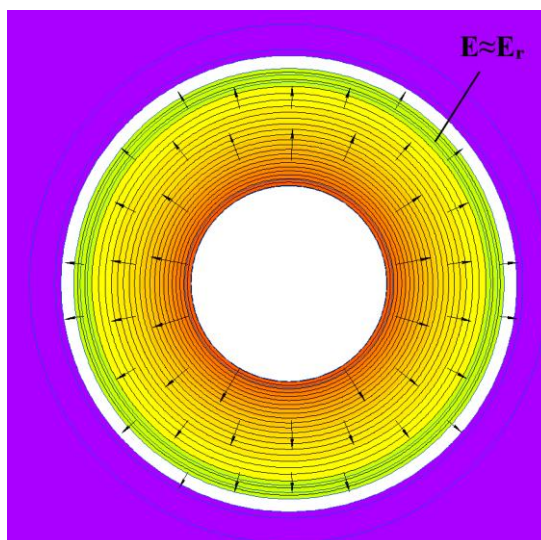


Рисунок 3 Картина поля в сечении кабеля в рабочем режиме

Как видно из предыдущих рисунков, электрическое поле в рабочем режиме вне зоны разделки содержит только одну – радиальную составляющую E_r .

Разделка же кабеля нарушает его заводскую изоляцию, т.е. происходит изменение конструкции. Это неизбежно ведёт к изменению распределения электрического поля в изоляции кабеля и в окружающем пространстве (рис.4).

Появляется касательная (тангенциальная) составляющая напряженности электрического поля, направленная вдоль поверхности изоляции. Она же является причиной возникновения скользящего разряда от жилы к

трансформированному в результате разделки, заземлённому экрану. Проводящий (как правило – медный многопроволочный) экран кабеля при разделке обрезается [3], [4], а его продолжением является полимерный (полупроводящим) экран, нанесённый на изоляцию методом экструзии (в случае XLPE – изоляции). Разряд возникает не сразу, а при достижении определённого, критического значения напряжённости электрического поля (и, естественно, его тангенциальной составляющей). Критическое значение зависит от толщины изоляции, диэлектрической проницаемости – ϵ материала изоляции, формы и размеров края электрода (обрезанного экрана).

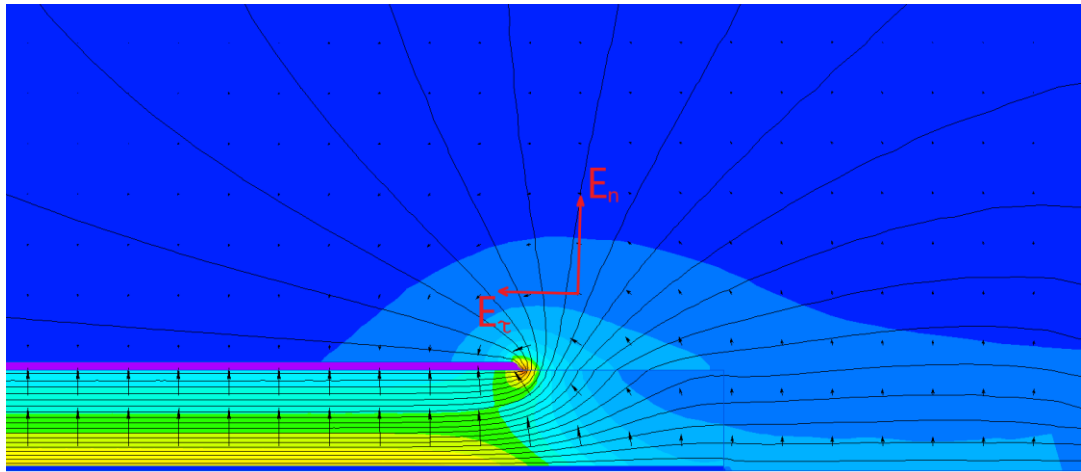


Рисунок 4 Картина напряженности электрического поля с эквипотенциальными линиями вблизи среза экрана по изоляции

Чтобы избежать пробоя, необходимо создать дополнительный усиливающий слой изоляции. В этом заключается основной вопрос при разработке кабельных муфт.

При конструировании усиливающей изоляции возможны два варианта:

1. Дополнительное изолирование без принудительного регулирования электрического поля.
2. Регулирование электрического поля в усиливающей изоляции.

Ясно, что для каждого класса напряжения можно создать кабельную муфту, где в качестве усиливающей изоляции будет выступать конструкция, которая состоит из изоляционных материалов, без использования

регулирования электрического поля, с толщиной, обеспечивающей надёжную работу, без пробоя (с высокой вероятностью). Но при этом данный метод приведёт к значительному увеличению габаритов кабельной муфты. К тому же с увеличением класса напряжения, эффективность подобного метода снижается. Отсюда следует, что наиболее оправданный метод – это применение регулирования электрического поля в разделке. Для рассмотрения существующих методов регулирования поля, изначально следует обратить внимание на схему замещения кабельной разделки, которая представляет собой цепочку из поперечных и продольных параллельных RC элементов по два поперечных элемента в каждой ячейке (рис. 5).

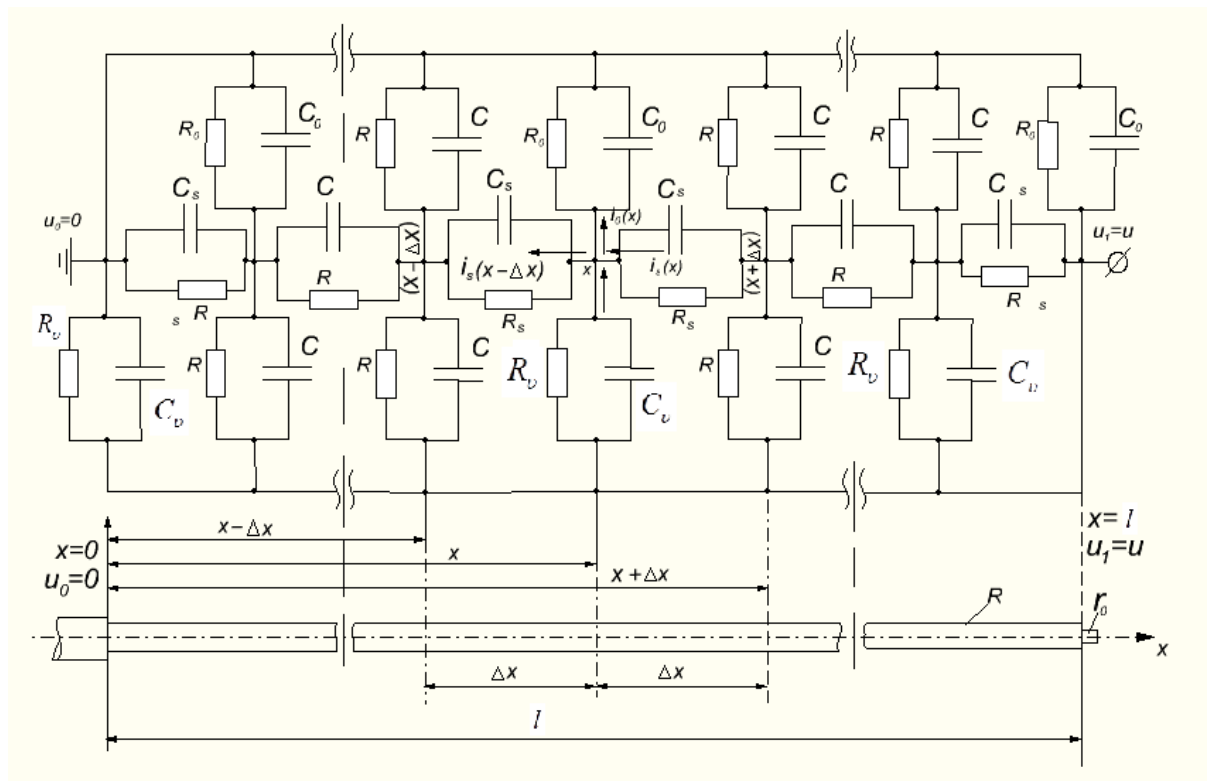


Рисунок 5 Схема замещения кабельной разделки

Где: C_0, C_v, C_s - ёмкость по отношению к земле, к жиле и продольная соответственно, Ф;
 R_0, R_v, R_s – сопротивление изоляции в направлении к земле, к жиле и продольное соответственно, Ом;
 l - длина кабельной разделки;
 x - координата произвольной точки поверхности разделки ($x = 0$ - начало отсчёта (край экрана), мм);
 $i_s(x)$ – продольный ток по поверхности длины разделки в точке x ;
 $i_v(x)$ - ток через изоляцию на жилу в точке x ;
 $i_0(x)$ - ток через изоляцию на землю в точке x ;
 R, r_0 - наружный радиус изоляции и радиус жилы соответственно, мм;

1) Емкостной метод выравнивания электрического поля

Этот метод основан, на регулировании ёмкостного тока на землю i_{c_0} , который стремится компенсировать емкостной ток на жилу i_{c_v} [5]. Данный метод включает в себя:

- Рефракционный способ регулирования электрического поля (рисунок 6) [6], Основывается на увеличении ёмкости C_0 за счёт применения материала со специальным наполнителем, который обеспечивает значение величины диэлектрической проницаемости, в разы превышающее соответствующий параметр основной XLPE-изоляции кабеля.

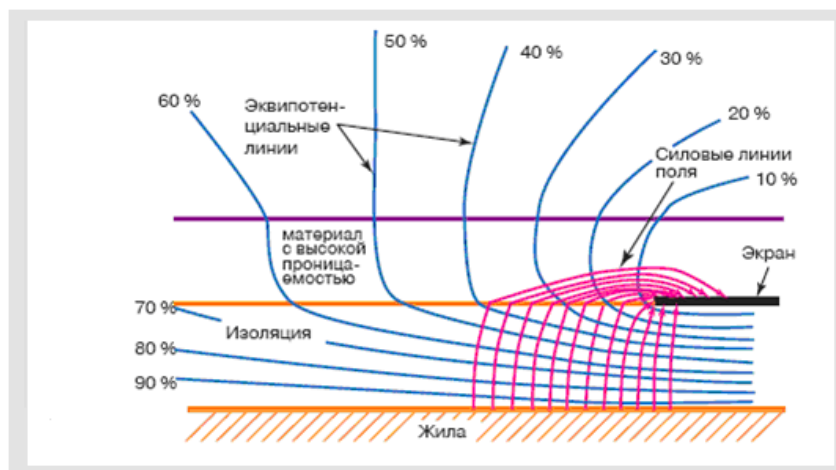
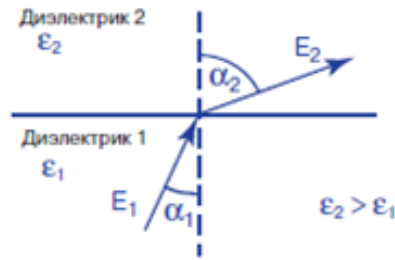


Рисунок 6 Рефракционный способ емкостного регулирования электрического поля

Увеличение значения диэлектрической проницаемости стресс конуса, по сравнению с тем же параметром изоляции самого кабеля, приводит к увеличению значения C_0 , и, следовательно к росту i_0 , компенсации величины i_v и, к выравниванию продольного поля муфты.

На границе раздела двух диэлектриков напряжённость электрического поля меняет направление, в результате уровни напряжённости в месте среза полимерного экрана резко снижаются. Величина изменения поля определяется углом преломления силовых линий, проходящих из одного диэлектрика в другой [7]. А этот угол зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей сред:



$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

- Геометрический способ регулирования электрического поля;

Нейтрализующее действие C_0 достигается путём применения проводящих экранов, в том числе – диффлектора или рефлектора.

Кривизна рефлектора должна обеспечивать компенсацию емкостного тока i_v через изоляцию кабеля на жилу, током смещения i_0 , через усиливающую изоляцию муфты на землю (рисунок 7) [8], [9].

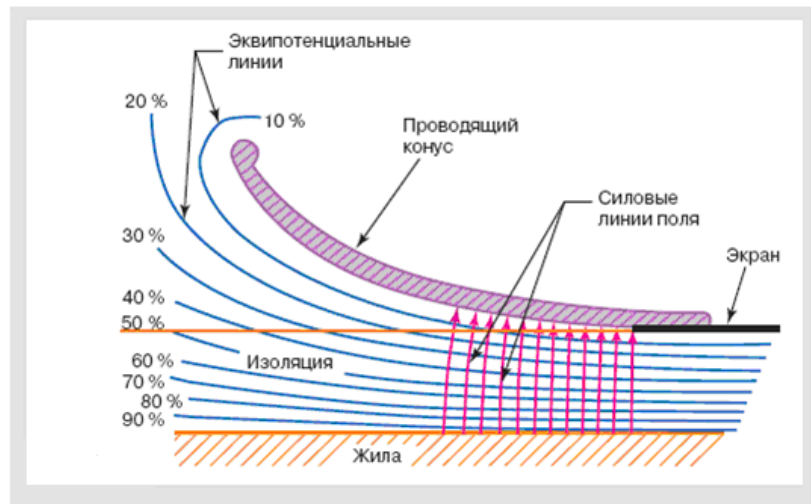


Рисунок 7 Геометрический способ емкостного регулирования поля

2) Резистивный (импедансный) метод выравнивания электрического поля;

Метод, основанный на изменении продольной проводимости $\frac{1}{R_S}$. В данный метод входят [10]:

- Нелинейный импедансный способ регулирования электрического поля;
- Линейный импедансный способ регулирования электрического поля.

Управление полем, с учётом нелинейных свойств материала, осуществляется путём перевода участка трубки с критическим значением тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в проводящее состояние, в результате пространственный заряд, сформировавшийся на этом участке и создающий дополнительное электрическое поле, уменьшил результирующее поле [11]. Проводимость материала регулирующего слоя σ зависит от поля ($\sigma(E)$) таким образом, что происходит её сильное увеличение в диапазоне от низкого значения $\sigma(0)$ до высокого, в диапазоне $E_B \pm \Delta E$. Это значение напряжённости E_B , называется напряжённостью включения [12].

Важным свойством материала, из которого изготовлен регулирующего слой, должна быть его способность обеспечить реверсивный характер перехода из состояния высокого сопротивления в состояние высокой проводимости [13]. Зная приложенное испытательное напряжение и максимально допустимые значения электрического поля на определенных участках, можно оценить диапазон вариаций E и σ , обеспечивающих эффективное выравнивание поля посредством регулирующего слоя, имеющего данную характеристику $\sigma(E)$ (рисунок 8).

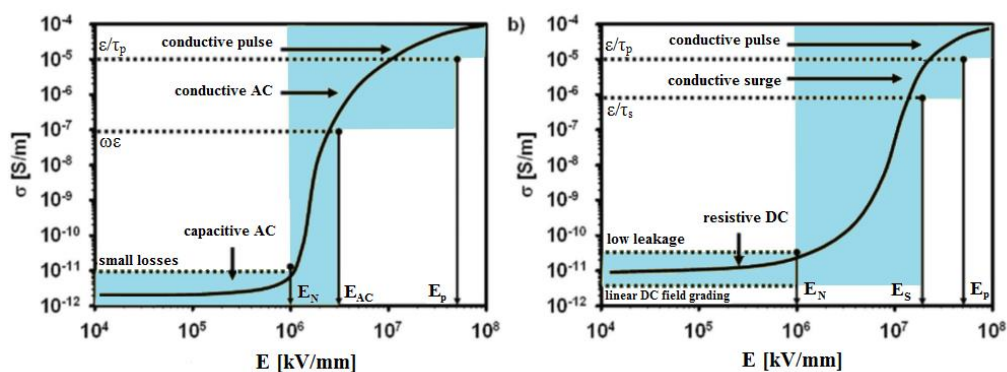


Рисунок 8 Качественная иллюстрация того, где располагается область, в E - σ плоскости для $\sigma(E)$ кривой идеального нелинейного резистивного сглаживающего поле материала: (а) при переменном токе, (б) при постоянном токе

Электрическое поле в изоляции кабеля вне зоны разделки является радиальным. В случае использования регулирующего слоя с рассчитанной

зависимостью $\sigma(E)$, скачок поля, появившийся в месте среза полупроводящего экрана по изоляции, перейдёт в зону основной изоляции кабеля.

В случае, когда в области разделки кабеля присутствуют только основная изоляция и усиливающие слои муфты, скачок поля произойдёт в одном из этих слоёв в зависимости от соотношения их проводимостей :

- $\sigma_{\text{из.каб}} < \sigma_{\text{ус.сл}}$ – в этом случае скачок произойдёт в изоляции кабеля (нижняя часть, край обрезанного экрана по изоляции) (рисунки 9-а и 9-б, соотношение $\sigma_{\text{из.каб}}/\sigma_{\text{ус.сл}}$ 100 и 1 соответственно);
- $\sigma_{\text{из.каб}} > \sigma_{\text{ус.сл}}$ – здесь усиление поля будет в верхней части у края обрезанного экрана (рисунок 9-с, соотношение $\sigma_{\text{из.каб}}/\sigma_{\text{ус.сл}} = 0.01$);

Если же два изоляционных слоя разделены между собой сглаживающей трубкой, у которой электропроводность хотя бы в 100 раз выше, из-за контакта полимерного экрана по изоляции с обрезанным металлическим экраном, возникает разность потенциалов вдоль разделительной высокопроводящей трубки. В результате, концентрация поля снижается (рисунок 9-д).

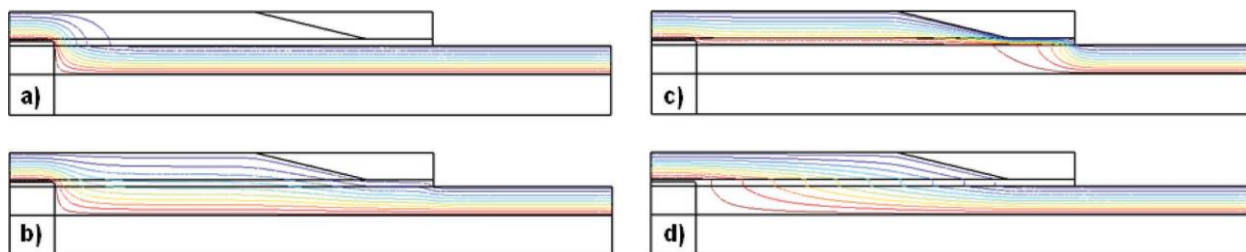


Рисунок 9 Распределение поля при разных соотношениях проводимости изоляции кабеля и усиливающей изоляции муфты, а также при наличии сглаживающей трубки

2. Моделирование и оптимизация усиливающей изоляции муфты, работа которой основана на комбинированном емкостном методе выравнивания поля

Основной элемент муфты, сочетающей в себе рефракционный и геометрический способы выравнивания электрического поля [14], является стресс-конус. Он представляет собой конусообразное двухслойное тело. Основная внешняя часть (основное изоляционное тело) изготавливается из резины с изоляционными свойствами. Внутренняя - диффлектор и

высоковольтный электрод – формируется из резины со специальными добавками.

Был решён ряд задач по оптимизации геометрических параметров и определении оптимально возможных физических величин основных элементов стресс-конуса соединительной муфты.

Необходимо отметить следующие особенности, построения модели:

- исследования проводилось в двумерной области на $\frac{1}{4}$ части кабельной разделки, так как конструкция стресс-конуса является симметричной относительно осей Oz и Oy ;
- Принято допущение, что все материалы, задействованные в моделировании изотропные, характеризуются постоянными значениями электропроводности и диэлектрической проницаемости [15];
- сторонние заряды отсутствуют;
- задача рассматривается для квазистатического приближения при частоте $f=50$ Гц.

В соединительной муфте больше зон, чем в концевой, где величина напряженности поля значительно выше, чем в остальной конструкции. Появляются две, дополнительные области (рисунок 10):

- Критическая зона по краям высоковольтного электрода (зона 3) [16];
- В случае нарушения конструкции в процессе монтажа, критическая зона на краю соединительной гильзы (зона 4) [17];

Эти зоны расположены вблизи проводящих элементов (гильза, диффлектор, основное изоляционное тело, полупроводящий экран по изоляции), где элементы обрываются (в случае среза полупроводящего экрана по изоляции и край соединительной гильзы) или резко меняют направление (край высоковольтного электрода и край диффлектора).

Рассматриваемый критерий при моделировании – минимальное значение напряженности электрического поля (его тангенциальной составляющей, которая не должна превышать значение в 5 кВ/мм (начало образования скользящего разряда)) в выделенных критических зонах.

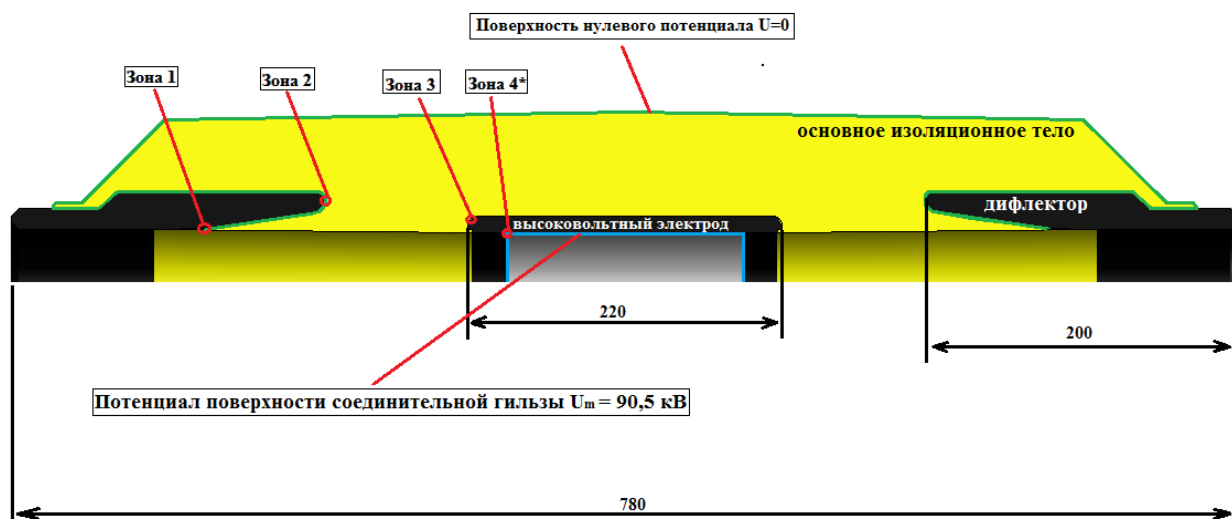


Рисунок 10 Конструкция стресс-конуса соединительной муфты и критические зоны напряжённости поля

Зона 1 - место среза полимерного экрана по изоляции;

Зона 2 – крайняя точка диффлектора по оси x ;

Зона 3 – место скругления высоковольтного электрода;

*Зона 4** – угол гильзы. Для учёта всех возможных случаев в задаче рассматривается модель без скруглённых краёв.

После определения местонахождения всех критических зон были установлены все параметры, влияющие на величину напряженности поля в этих зонах:

- Диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела;
- Электропроводность диффлекторов и высоковольтного электрода;
- Длина высоковольтного электрода;
- Длина диффлектора;
- Угол наклона диффлекторов к оси кабеля;
- Расстояние между высоковольтным электродом и диффлектором;

В результате проведенного моделирования была получена следующая конструкция:

- общая длина стресс конуса – 660 мм;
- Распределение напряжённости поля в зоне среза экрана по изоляции показывает, что её значение прямо пропорционально углу между касательной к

начальному участку диффлектора и осью кабеля (углу наклона) и этот угол следует делать, по возможности, меньшим (в данной модели угол равен 5°);

- длина диффлектора (проекция на ось кабеля) – 170 мм (с каждой стороны);
- расстояние между высоковольтным электродом и диффлектором – 65 мм;
- Диэлектрическая проницаемость основного изоляционного тела -12;
- Электропроводность диффлекторов и высоковольтного электрода $\geq 2 \cdot 10^{-4}$ См/м;

При этих параметрах максимальное расчётное значение тангенциальной составляющей напряженности поля $E_t = 2,45$ кВ/мм (Зона 3). Для наглядности распределения силовых линий в стресс-конусе были построены кривые через исследуемые критические зоны (рисунок 11, 12):

- «АВ» - линия, проходящая по поверхности высоковольтного электрода и заканчивающаяся в месте стыка его с изоляцией кабеля (проходит через критическую Зону 3);
- «ВС» - линия от стыка высоковольтного электрода и изоляции кабеля, до стыка диффлектора и полимерного экрана по изоляции кабеля, проходящая по поверхности изоляции кабеля (проходит через критическую Зону 1);
- «CD» - линия, проходящая по поверхности диффлектора (проходит через критическую Зону 2)

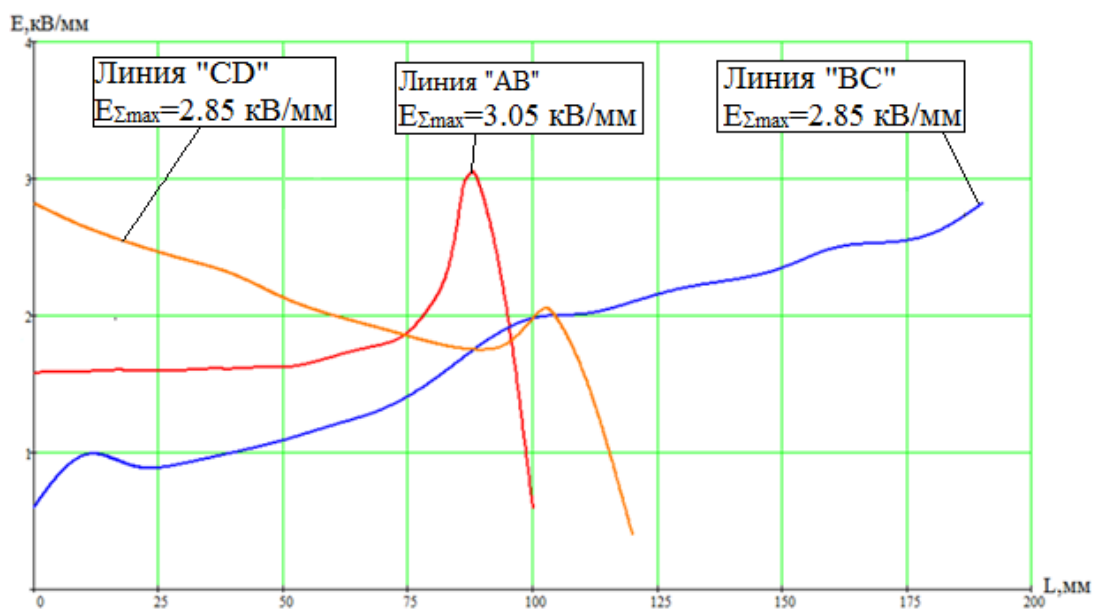


Рисунок 11 Распределение модуля напряжённости электрического поля вдоль расчётных контуров усиливающей изоляции

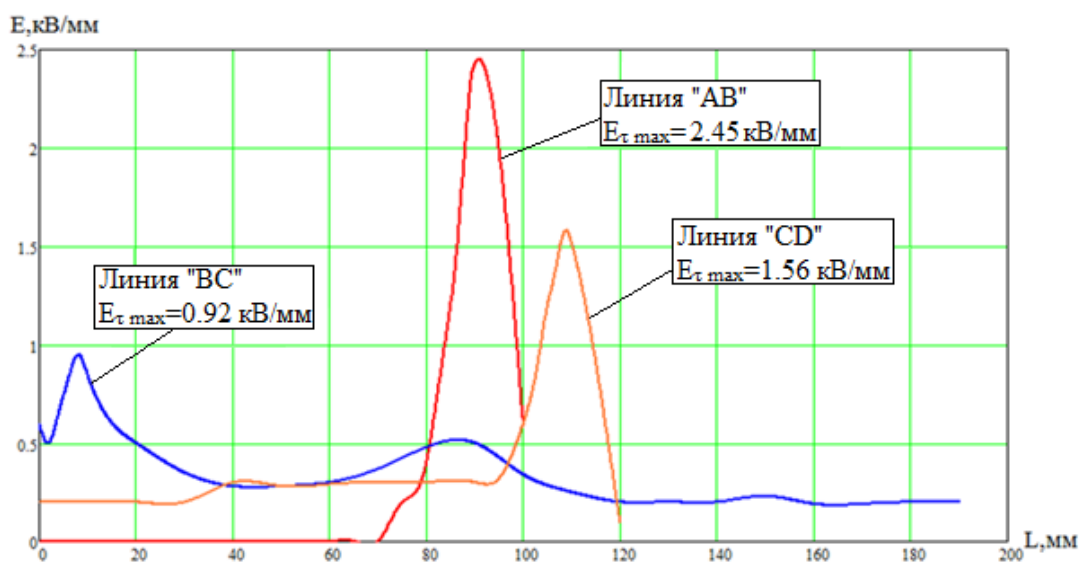


Рисунок 12 Распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля вдоль расчётных контуров усиливающей изоляции

Далее был проведён сравнительный анализ существующих (на тот момент) зарубежных аналогов («Zuit» (рисунок 13) и «Pfisterer» (рисунок 14)) с разработанной конструкцией.

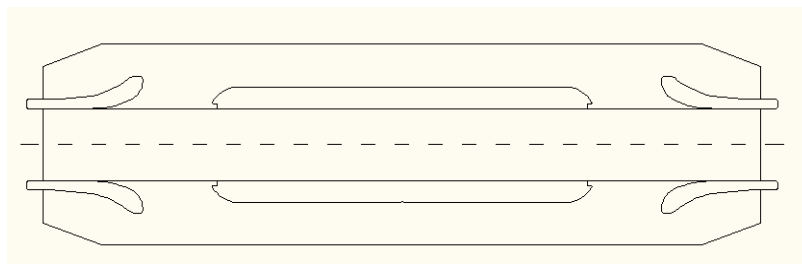


Рисунок 13 Чертёж эластомерного элемента управления полем фирмы Zuit

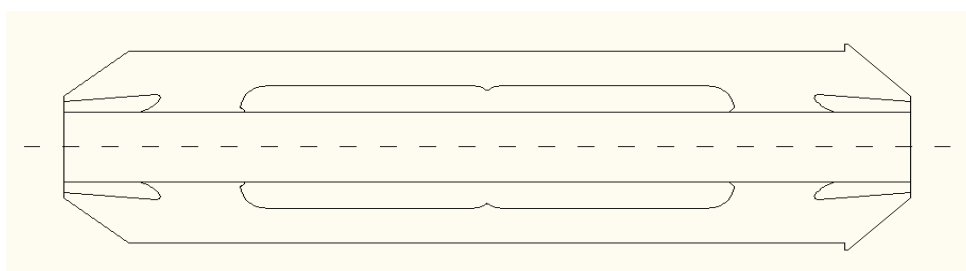


Рисунок 14 Чертёж эластомерного элемента управления полем фирмы Pfisterer

В ходе сравнения были получены значения максимальной суммарной и тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в каждой из конструкций, указанных в таблице 1

Таблица 1: Значения напряженности электрического поля исследованных стресс-конусов в критической зоне 3

Наименование	E_{Σ} , кВ/мм	E_{τ} , кВ/мм
«Zuit»	4,1	4.09
«Pfisterer»	2,69	1.64
Разработанный	3.39	2.74

Как видно из полученных результатов, разработанный стресс-конус незначительно уступает швейцарскому стресс-конусу фирмы Pfisterer, в то время как значения напряженности электрического поля (как тангенциальной, так и суммарной) у немецкого стресс-конуса «Zuit» значительно выше, чем у разработанного.

3. Регулирование поля в соединительных муфтах, использующих комбинированный резистивно-емкостной принцип выравнивания электрического поля

Анализ разделки высоковольтного кабеля из СПЭ изоляции, позволил построить первоначальную модель трубки-регулятора (рисунок 15).

Были определены следующие изначальные положения по конструкции (рисунок 15):

- Для первоначального выравнивания поля, в месте среза экрана по изоляции и в месте соединения двух отрезков кабелей гильзой, необходимо «сгладить» силовые линии поля в этих местах трубкой с высокой электропроводностью, т.е. резистивным методом. Далее трубки с подобными свойствами будут называться «полупроводящая вставка» (п/пВ) («3»);
- Далее для ещё большего выравнивания, поверх проводящей трубки предполагается использовать трубку с высоким значением диэлектрической проницаемости, т.е. использующую рефракционный способ выравнивания поля. Трубки с подобными свойствами далее будут называться «диэлектрический экран» (ДЭ) («4» и «6»);
- Перед усадкой дополнительного изоляционного слоя рекомендуется выровнять геометрию при помощи изоляционных лент («5»);
- Затем усаживается дополнительный изоляционный слой из трубок без специальных добавок («7»);

Для более тщательной оптимизации было выделено 7 предварительных критических Зон, опираясь на значения напряженности в которых, проводилась оптимизация (рисунок 15).

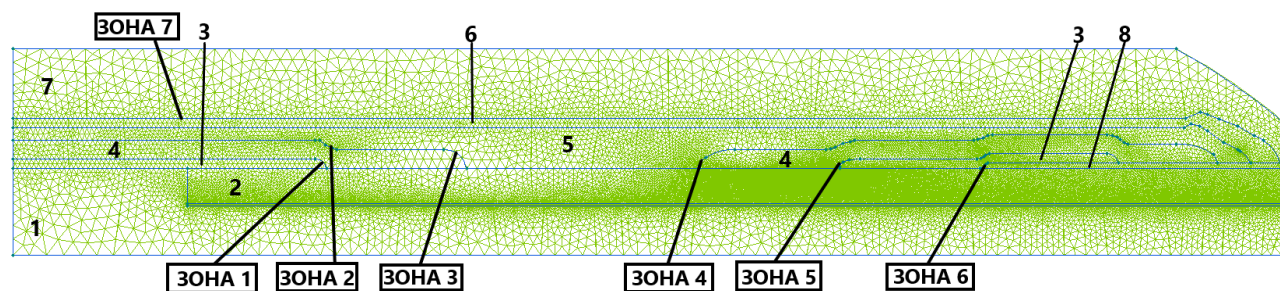


Рисунок 15 Предварительная конструкция трубки-регулятора с критическими зонами

- 1- Токопроводящая жила с соединительной гильзой;
- 2- Основная изоляция кабеля
- 3- Первый слой многофункционального элемента над гильзой и над полупроводящим экраном по изоляции (полупроводящая вставка);
- 4- Второй слой многофункционального элемента с высоким значением диэлектрической проницаемости (диэлектрический экран);
- 5- Подмотка;
- 6- Третий слой (большой ДЭ);
- 7- Верхний изоляционный слой.

3.1. Этапы моделирования

После определения первоначального состава многофункционального элемента и определения всех критических зон в модели, были определены все параметры, которые необходимо оптимизировать:

1. Геометрические и физические параметры п/пВ;
2. Геометрические и физические параметры ДЭ;
3. Толщины подмотки и верхнего дополнительного изоляционного слоя;
4. Расстояние между п/пВ и ДЭ;

Ранее было обнаружено, что использование соединительной гильзы длиной 150 или 160 мм не влияет на картину поля в целом. Поэтому для уменьшения общих габаритов конструкции было принято использовать гильзу длиной 150 мм.

В процессе моделирования на некоторых этапах приходилось рассматривать влияние одновременно двух параметров на величину напряженности поля в критических зонах (рисунок 16)

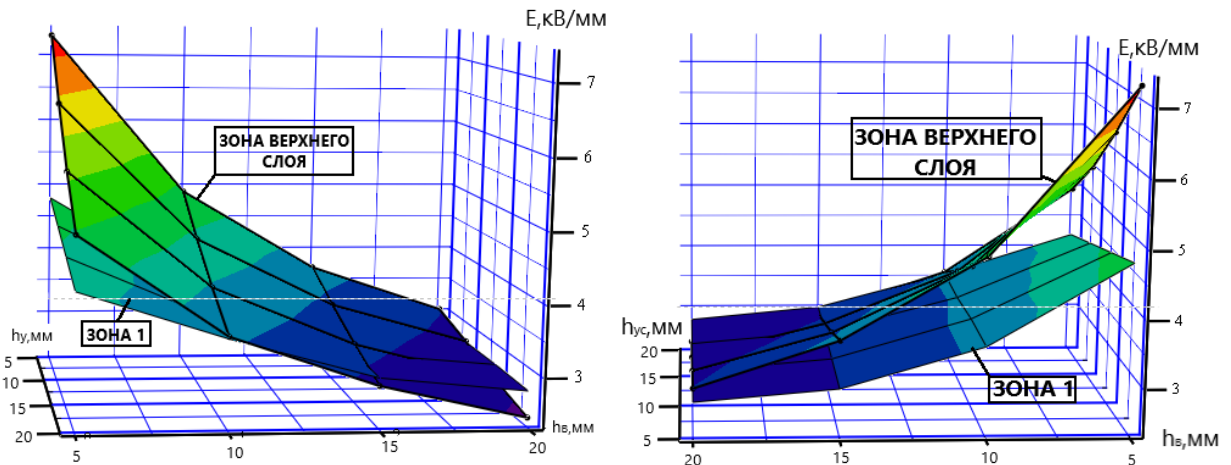


Рисунок 16 Графики зависимости напряженности поля E от толщины большого ДЭ и толщины верхнего изоляционного слоя в Зонах 1 и 7

В процессе оптимизации данной конструкции были определены геометрические и физические параметры трубки-регулятора, при которых значение напряженности электрического поля принимает минимальное значение:

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ:

- Толщина полупроводящей вставки – 5 мм;
- Толщина диэлектрических экранов над гильзой и над п/п экраном по изоляции – 12 мм;
- Толщина верхнего изоляционного слоя – 20 мм;
- Толщина большого диэлектрического экрана – 15 мм;
- Длина полупроводящей вставки над гильзой – 250 мм;
- Длина полупроводящей вставки над п/п экраном по изоляции, которая усаживается непосредственно на основную изоляцию кабеля – 120 мм;
- Расстояние между краями полупроводящей вставки и диэлектрическими экранами – 55 мм;
- Расстояние между диэлектрическими экранами – 80 мм;
- Большой диэлектрический экран должен полностью покрывать всю конструкцию, которая находится под ним. Его длина должна составлять не менее 900 мм;

- Длина верхнего изоляционного слоя должна быть больше длины большого диэлектрического экрана. Чтобы полностью покрыть всю конструкцию. Поэтому это значение должно быть больше 1100 мм.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ:

- Диэлектрическая проницаемость $\text{ДЭ} = 10$;
- Подмотка, которая должна выровнять геометрию модели перед тем, как усаживать большой диэлектрический экран, должна быть изоляционной;
- Электропроводность полупроводящей вставки $\gamma_{\text{п/пв}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$;
- Верхний изоляционный слой – изоляционные трубки без специальных свойств.

При таких параметрах общая картина электрического поля в усиливающей изоляции принимает вид, показанный на рисунке 17.

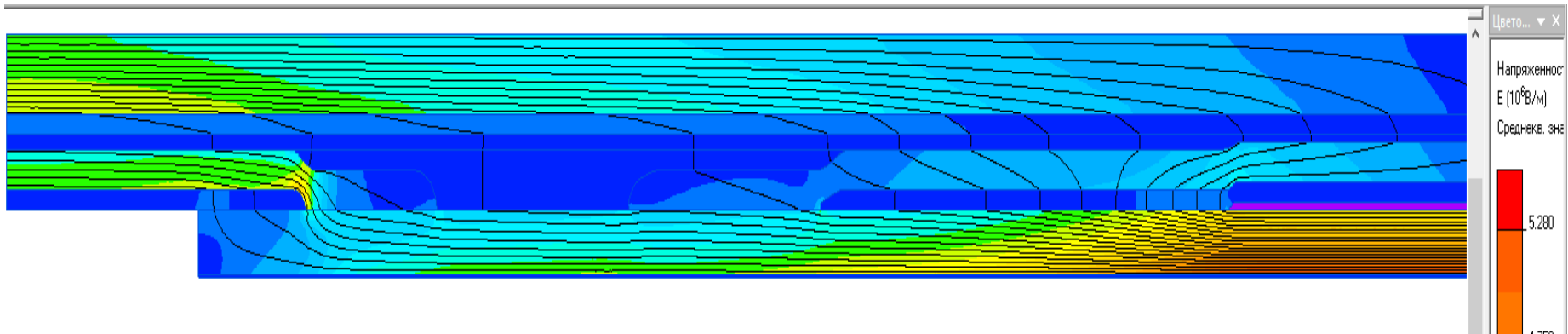


Рисунок 17. Картина распределения напряженности электрического поля в трубке-регулятор

При этом значения касательной и суммарной составляющей напряженности электрического поля в критических зонах принимает значения, указанные в таблице 2.

Таблица 2: значения напряженности электрического поля во всех критических зонах

Зоны	1	2	3	4	5 (ус.из/осн.из)	6	7
E_{Σ}, кВ/мм	3.57	0.10	1.51	1.74	1.37/2.71	3.64	2.60
E_{τ}, кВ/мм	3.27	0.04	1.50	1.72	0.07/2.62	3.62	2.60

Как видно из полученных значений, напряженность поля касательной составляющей в конструкции не превышает допустимого значения (5 кВ/мм), что говорит о работоспособности данной модели.

3.2. Проверка работоспособности модели при отклонении от заданных параметров

В процессе монтажа муфты, велика вероятность отклонения конструкции при усадке элементов. Чтобы лучше понять, как скажется отклонение того или иного геометрического параметра на общей картине поля, был проведён ряд исследований, где изменялись наиболее вероятные величины: длина п/пВ, длина ДЭ, расстояние между ДЭ и расстояние от края п/пВ и ДЭ.

В результате моделирования был получен ряд данных, среди которых можно выделить самые критические, что указаны на рисунках 18 и 19, и соответственно в таблицах 3 и 4.

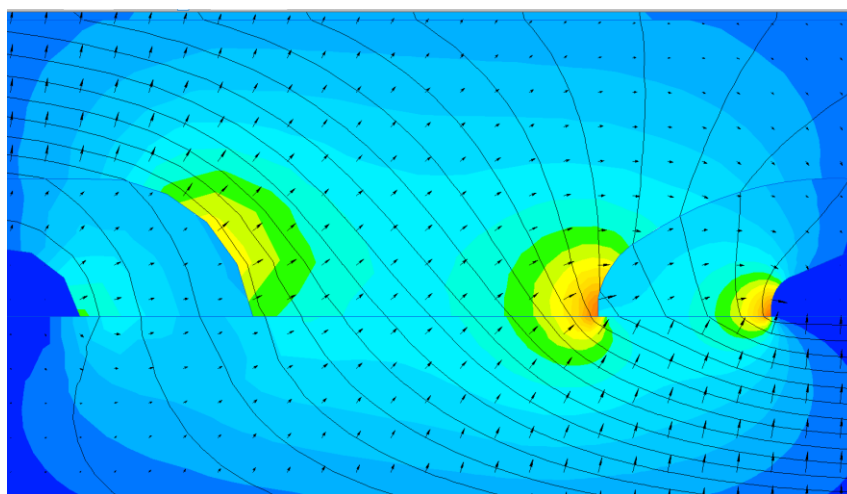


Рисунок 18 Картина распределения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля при сближении диэлектрических экранов (40 мм) и полупроводящих вставок

Таблица 3: значения тангенциальной и суммарной напряженности поля E в критических зонах при сближении диэлектрических экранов

Зоны	1	2	3	4	5	6	7
E_{Σ}, кВ/мм	1.8	3.53	0.66	4.5	3.84	1.2	2.60
E_{τ}, кВ/мм	1.69	1.2	1.50	4.2	3.84	1.0	0.2

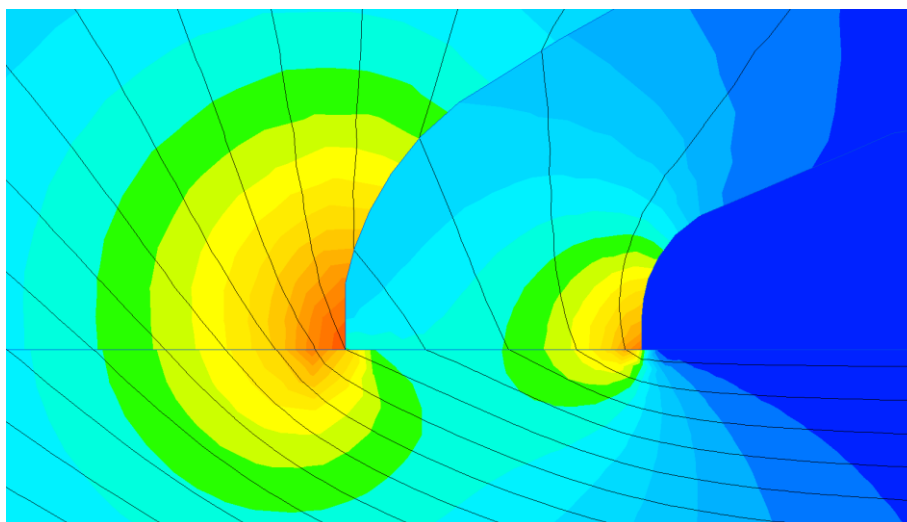


Рисунок 19 Картина распределения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля при сближении края полупроводящей вставки к краю диэлектрического экрана

Таблица 4: значения тангенциальной и суммарной напряженности поля E в критических зонах при значительном сближении краёв п/пВ и ДЭ

Зоны	1	2	3	4	5	6	7
E_{Σ} , кВ/мм	1.8	3.3	1.93	4.35	4.37	0.9	2.0
E_{τ} , кВ/мм	1.75	1.87	1.8	4.1	4.37	0.2	0.1

Проведя анализ полученных результатов можно сделать вывод, что даже при значительном отклонении геометрических параметров трубки-регулятора, напряженность электрического поля может значительно изменять свои величины, но при этом, в пределах проведённых измерений, её значения не превышают допустимых величин (таблица 5).

Таблица 5: Максимальное значение E_{τ} до и после изменения параметров

Максимальное значение E_{τ} до изменения параметров, кВ/мм	Тип изменения	Максимальное значение E_{τ} после изменения параметров, кВ/мм	Соотношение полученных величин к базовому
3.62	Сближение ДЭ	3.84	1.06
	Сближение п/пВ	4.37	1.21

Важно отметить, что в данной конструкции главное соблюдать последовательность усадки слоев. Так же не допустимо, чтобы верхние слои были короче нижних (то есть край п/пВ не должен выступать за диэлектрический экран).

4. Экспериментальная часть исследований

Полимеры широко используются в электротехнике, электронных приборах, в различном оборудовании, где важно иметь материалы с определенными электрическими и теплофизическими характеристиками [18].

В настоящее время существуют две тенденции развития научно-исследовательских работ в области создания композиционных материалов с определенными электрическими и теплофизическими композиционными материалами. Одна из них – создание композиционных материалов на основе различных полимерных связующих с наполнителями придающие необходимые диэлектрические, электропроводящие и термопроводящие характеристики, другая – синтез полимеров с определенными свойствами [19]. Проблема получения электропроводящих композиционных материалов, обладающих сочетанием разнообразных свойств, не теряет своей актуальности, поскольку невысокая механическая прочность и химическая нестабильность синтезированных полимеров ограничивают возможности их практического использования [20].

4.2. Исследование по увеличению теплопроводности трубки-регулятора

При создании полимерных материалов с заданными свойствами часто возникает задача регулирования теплофизических характеристик. Применение добавок позволяет создавать композиционные полимерные материалы, у которых теплофизические свойства отличаются в десятки раз. При разработке высокоэффективных полимерных систем для охлаждения наружных светодиодных осветителей особый интерес представляет создание матричных полимерных композитов с высокотеплопроводящими наполнителями [21], [22].

Исходным материалом являлся полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) Borealis 4423. ПЭНП модифицировался путём введения в структуру углеродных нановолокон и микроволокон в количестве от 1% до 15% от общей массы модифицированного полимера. Углеродные нановолокна (Carbon nanofibers – CNF) имеют следующие геометрические характеристики: диаметр ~ 100 нм, длина от 20 до 200 мкм. Плотность включений составляет $(1,4-1,6)$ г/см³, а удельная поверхность – 39 мм²/г.

Лабораторные блочные образцы были получены в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 2 мм литьевым способом из расплава. Для получения композитов на основе полиэтилена и углеродных нано волокон, сухую смесь (шихту) двух порошков загружали в двух шнековый экструдер (рисунок 20). В экструдере при температуре 165°C за счет сильных сдвиговых усилий происходило диспергирование агрегатов углеродных нано волокон до нано размерного состояния наполнителя и их равномерное распределение в полиэтилене. Затем полученный сплав загружали в литьевую машину – «литник» (рисунок 21) нагретый до 170°C . Далее осуществляли впрыск расплава в пресс форму, нагретую до 70°C .

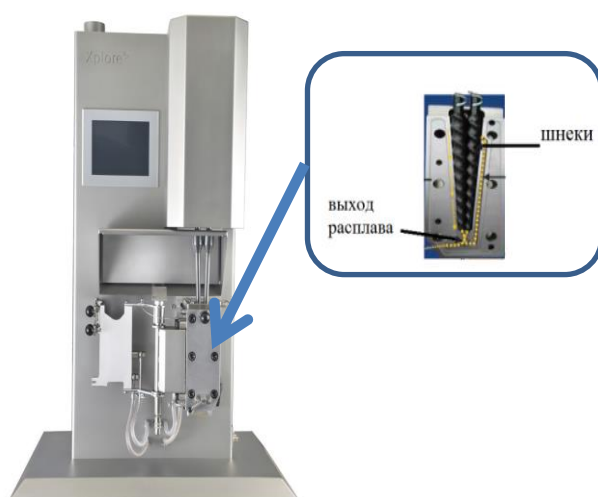


Рисунок 20 Двухшнековый экструдер для диспергирования



Рисунок 21 Литьевая машина

Структура полученных композитов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Для исследования равномерности распределения и диспергирования углеродных nano волокон (УНВ), в полиэтилене делали поперечный скол в жидком азоте.

При анализе сколов композитов на основе ПЭНП с добавлением УНВ установлено, что используемые УНВ достаточно равномерно распределены в объеме полиэтилена (рисунки 22-25) и диспергированы до исходных nano размерных частиц без наличия существенных агрегатов.

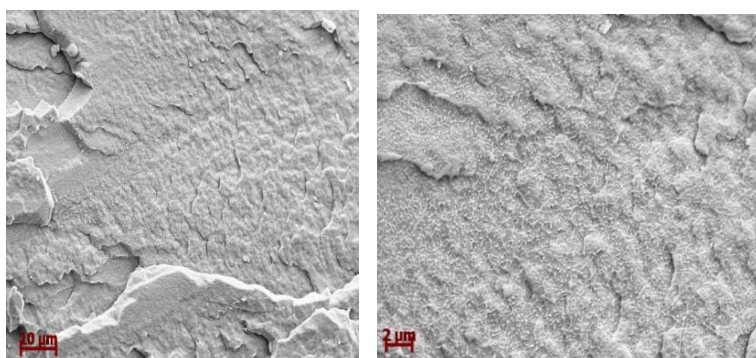


Рисунок 22 Фотография СЭМ скола ПЭНП не содержащего УНВ

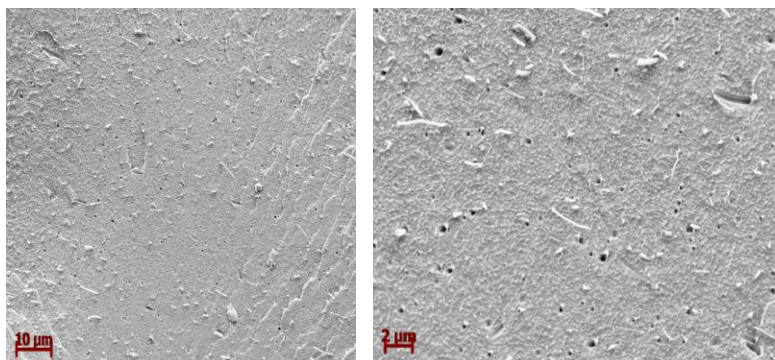


Рисунок 23 Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 3 % УНВ

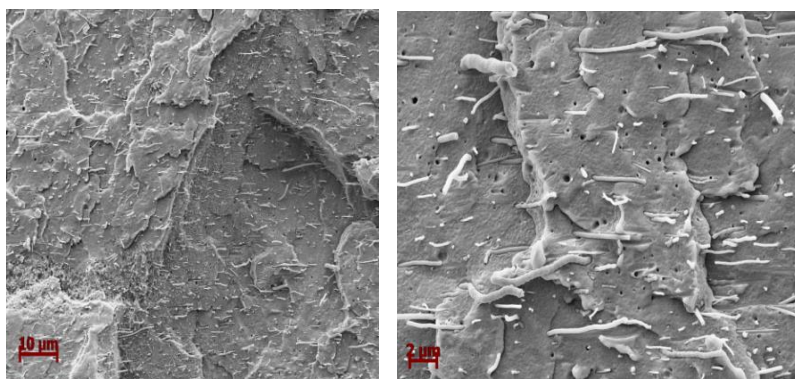


Рисунок 24 Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 5 % УНВ

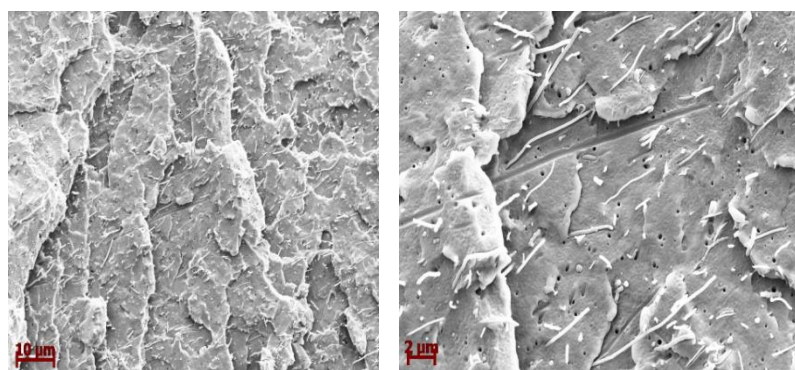


Рисунок 25 Фотография СЭМ скола композита на основе ПЭНП содержащего 7 % УНВ

По полученным данным (таблица 6) был построен график, показанный на рисунке 26.

Таблица 6: наглядные показатели улучшения теплопроводности при внедрении УНВ при 75°C

Содержание УНВ	Значение теплопроводности λ , Вт/м·К	Отношение теплопроводности КМ и чистого ПЭ
1%	0.25	1.25
5%	0.298	1.49
7%	0.319	1.6
15%	0.383	1.9

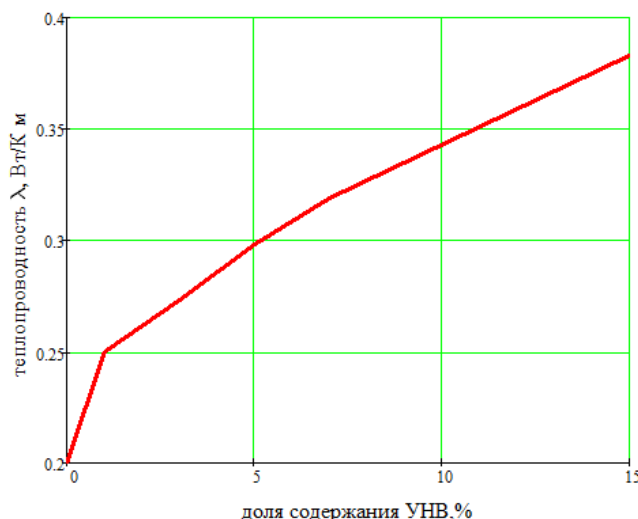


Рисунок 26 График зависимости коэффициента теплопроводности композиционного материала на основе ПЭНП от содержания УНВ

Таким образом, сделаем следующие выводы: на лабораторном экструдере были получены образцы композиционного материала на основе ПЭНП с различным процентным содержанием УНВ. Исследование на сканирующем электронном микроскопе показало, что используемые УНВ достаточно равномерно распределены в объеме полиэтилена. Измерения, проведенные на $ИТ - \lambda - 400$, позволили получить зависимость коэффициента теплопроводности от процентного содержания УНВ в пределах от 1 – до 15%. При массовом процентном содержании УНВ равном 15%, при температуре 75°C, теплопроводность материала увеличилась в 1.9 раза.

4.3. Исследование по увеличению диэлектрической проницаемости образцов

Диэлектрическая постоянная представляет собой физическую особенность, связанную с электрической поляризуемостью материала. Физически, чем больше поляризация, развитая в материалах, тем выше диэлектрическая постоянная [23]. По сравнению с величиной диэлектрической постоянной диоксида кремния, которая равна 3.9, диэлектрические материалы классифицируются на материалы с высокой диэлектрической постоянной ($>3,9$) и материалы с низкой диэлектрической постоянной ($<3,9$) [24].

В последнее время наблюдается значительный интерес к обоим видам диэлектрических материалов благодаря их широкому спектру применений в электронной и электротехнической промышленности. Например, материалы с высокой диэлектрической постоянной могут служить эффективными материалами для изоляции кабелей, при изготовлении конденсаторов и др. [25].

В последние годы для повышения диэлектрических свойств полимера вводят сегнетоэлектрики - это оксиды металлов, такие как TiO_2 , ZrO_2 , BaTiO_3 и другие соли титанатов. Значения диэлектрической проницаемости широко используемой керамики для конденсаторов представлено в таблице 7. Как мы видим, наибольшей диэлектрической проницаемостью обладает титанаты металлов [25].

Таблица 7- Диэлектрическая проницаемость керамики

Наполнитель	Диэлектрическая проницаемость
BaTiO_3	1700
SiO_2	3,9
TiO_2	80
SrTiO_3	2 000
$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$	60 000

Анализ литературных данных [26], [27], [28], показал, что наибольшее применение для повышения диэлектрической проницаемости нашли порошки титаната металлов (титаната бария). Для сферических наполнителей порог перколяции достигает $\sim 25-35$ об.%. Таким образом, для существенного повышения диэлектрической проницаемости полимерного материала необходимо вводить достаточное большое количество «керамики», что может приводить к снижению ряда характеристик полимерного материала как эластичность и коэффициент термического расширения. Для снижения концентрации «керамики» необходимо повышать соотношение длины к диаметру, т.е. использовать частицы в форме стержней, волокон. В таком случае можно снизить порог перколяции до 18% [28].

Исходным материалом данных исследований являлся полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) Borealis 4423. ПЭНП модифицировался путём введения в структуру углеродных нанотрубок (ОСУНТ) в количестве от 0.05% до 2% от общей массы модифицированного полимера.

При исследовании опытных образцов были получены данные, которые отображены в таблице 8 на рисунке 27.

Таблица 8: значение диэлектрической проницаемости композиционного материала при различных значениях процентного содержания ОСУНТ

Концентрация ОСУНТ, %	C, пФ	ϵ
0	8,8	3,36
0,05	9,07	3,46
0,1	9,1	3,47
0,2	9,3	3,60
0,5	9,94	3,79
1	9,81	3,74
2	19,3	7,36

Измерения проводились на образцах в форме дисков со следующими геометрическими параметрами:

- Диаметр образцов = 24,5 мм;
- Толщина $h=1,6$ мм.

Из полученных данных мы видим, что с увеличением процентного содержания углеродных нанотрубок диэлектрическая проницаемость растет. Испытания проводились при частоте 1 кГц.

При таких значениях, данный материал можно использовать в составе трубки-регулятора в виде диэлектрических экранов.

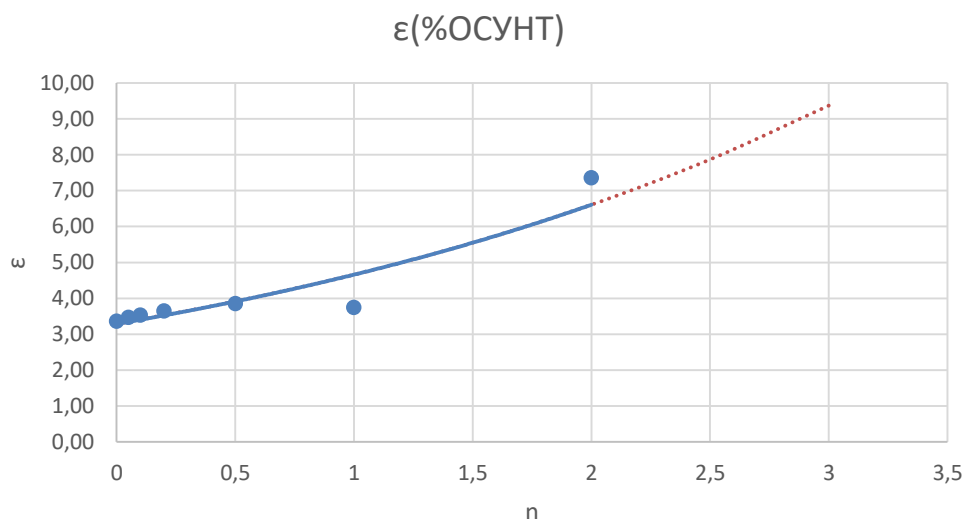


Рисунок 27 Зависимость диэлектрической проницаемости (ε) композита от процентной концентрации (n) ОСУНТ

Так как ОСУНТ является армирующим элементом, добавлять его больше 2% нецелесообразно, потому что увеличение прочности материала ведёт к ухудшению термической усадки композита.

Важно отметить, что вероятнее всего есть возможность получить большие значения диэлектрической проницаемости композиционного материала на основе полиэтилена с добавлением ОСУНТ, при том же процентном содержании наполнителя. Это можно сделать путём переориентации нанотрубок, что на данном этапе исследований было сделать невозможно в связи с отсутствием соответствующего оборудования.

4.4. Предварительные испытания макета

После разработки предварительной конструкции макета многофункционального элемента и его оптимизации были проведены предварительные высоковольтные испытания макетов. Перед тем, как начать монтаж непосредственно для испытаний, была отработана методика сборки предварительной конструкции трубки-регулятора, указанной на рисунке 28.

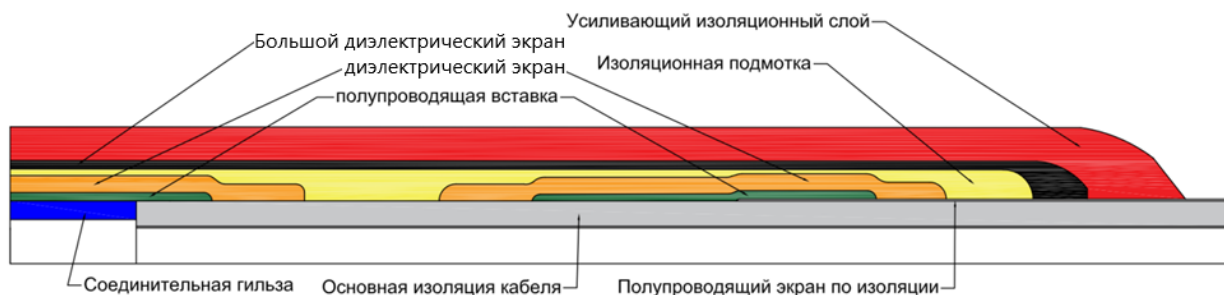


Рисунок 28 Компьютерная модель оптимизированной трубки-регулятора

Электрические испытания макетного образца соединительной кабельной муфты на напряжение 110 кВ проведены в соответствии с утверждённой «Программой и методикой предварительных электрических испытаний макетных образцов соединительной муфты в виде трубки-регулятора на напряжение 64/110 кВ в составе кабельной системы» в следующей последовательности¹:

1. Измерение частичных разрядов при температуре окружающей среды под напряжением $1,5U_0$ (96 кВ).
2. Испытание кабельной системы при температуре окружающей среды напряжением промышленной частоты значением $2,5U_0$ (160 кВ).

Таблица 9: Перечень испытательного оборудования и средств измерений, условия проведения испытаний

№ п/п	Наименование ИО/СИ	Наименование документа о поверке	Дата очередной поверки
1	Резонансная испытательная система WR 6000/350-200-100	Протокол №034/2019 от 17.05.2019	17.05.2020
2	Гигрометр психрометрический ВИТ-2	Свидетельство №0002546 от 16.01.2019	16.01.2021

Испытания проводились в закрытом помещении при следующих атмосферных условиях:

- температура окружающей среды: +21°C;
- влажность: 60%;
- атмосферное давление: (100,2-101,4) кПа.

¹ ГОСТ Р МЭК 60840-2011. Кабели силовые с экструдируемой изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ.

4.4.1. Результаты проведенных испытаний

- Измерение частичных разрядов.

Измерение проводилось при температуре окружающей среды. Условия проведения измерения частичных разрядов и результаты представлены в таблице 10.

Таблица 10: Условия проведения измерения частичных разрядов и результаты

Параметр	Требования для испытаний	Фактическое значение измеряемого параметра
Чувствительность схемы измерения, пКл	$\geq 5,0$	7,0
Температура окружающей среды, °С		+ 21°С
Испытательное напряжение частоты 50 Гц, кВ	96	96
Частичные разряды в изоляции, пКл	Отсутствие разрядов в изоляции	Частичные разряды фиксировались ($\sim 10^4$ пКл)

Испытательное переменное напряжение промышленной частоты постепенно повышалось и поддерживалось на уровне $1,75U_0$ (112 кВ) в течение 10 с, затем медленно снижено до значения $1,5U_0$ (96 кВ), при котором производилось измерение.

- Испытание переменным напряжением

Испытание системы напряжением промышленной частоты проводилось при температуре окружающей среды. Условия проведения испытания и результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11: Условия проведения испытания и результаты испытаний напряжением

Параметр	Требования для испытаний	Фактическое значение измеряемого параметра
Испытательное напряжение частоты 50 Гц, кВ	160	160
Время приложения напряжения, мин	30	28
Пробой изоляции муфты	Отсутствие пробоя	Пробой изоляции муфты

4.4.2. Демонтаж

После окончания испытаний произведён демонтаж макетного образца и последующий осмотр. Внешним осмотром без применения увеличительных приборов определено место выхода проводящего канала в усиливающей изоляции при пробое, имеющее форму овала 1-2 мм в поперечнике. При последующей разделке и снятии слоёв изолирующих трубок, диэлектрических экранов и подмотки изолирующими полупроводящими лентами наблюдается повреждение изолирующих слоёв на всю толщину **по обе стороны от краёв обмотки поверх соединительной гильзы**. Повреждения имеют вид прожогов с оплавленными краями 3 – 4 см в поперечнике со следами поверхностного распространения электрического разряда. Обнаруженные при разделке повреждения показаны на рисунках 29-31.

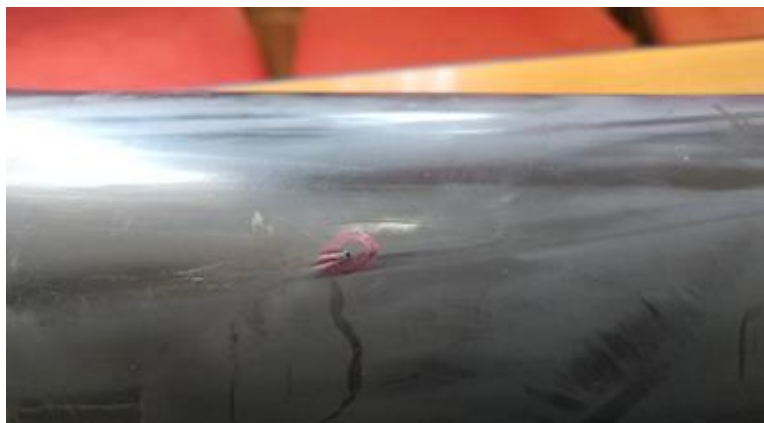


Рисунок 29 Пробой на внешней поверхности соединительной муфты



Рисунок 30 Пробой слоя усиливающей изоляции



Рисунок 31 Прожог усиливающей изоляции по обе стороны от соединительной гильзы

5. Обновлённые конструкции трубки-регулятора

После проведённых испытаний и демонтажа макетного образца была переработана первоначальная конструкция многофункционального элемента. В результате, было предложено две новые конструкции, показанные на рисунках 32 и 34.

Анализируя распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в обеих конструкциях можно определить количество и местонахождение критических зон (рисунок 33 и 35)

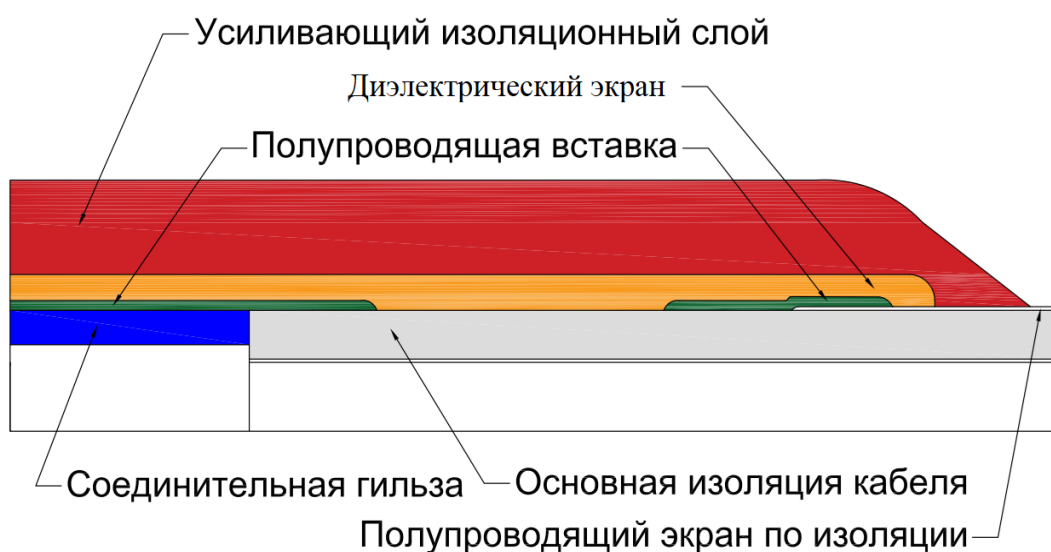


Рисунок 32 Обновлённая модель трубки-регулятора типа "Д.С."

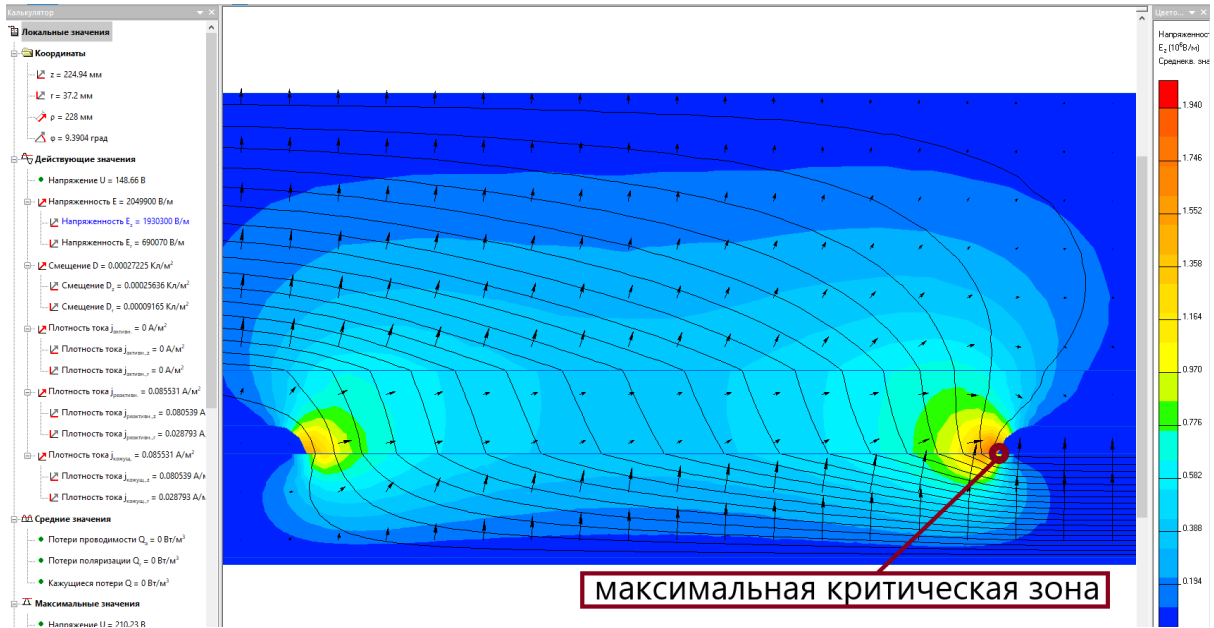


Рисунок 33 Картина распределения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в модели трубки-регулятора типа "Д.С."

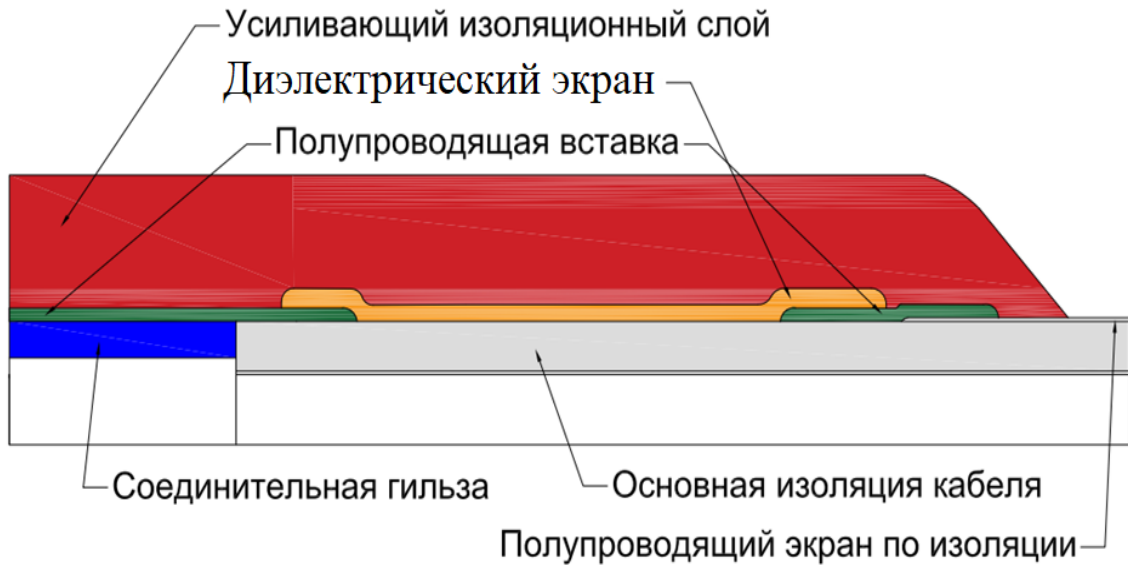


Рисунок 34 Обновлённая модель трубки-регулятора типа "Г.В."

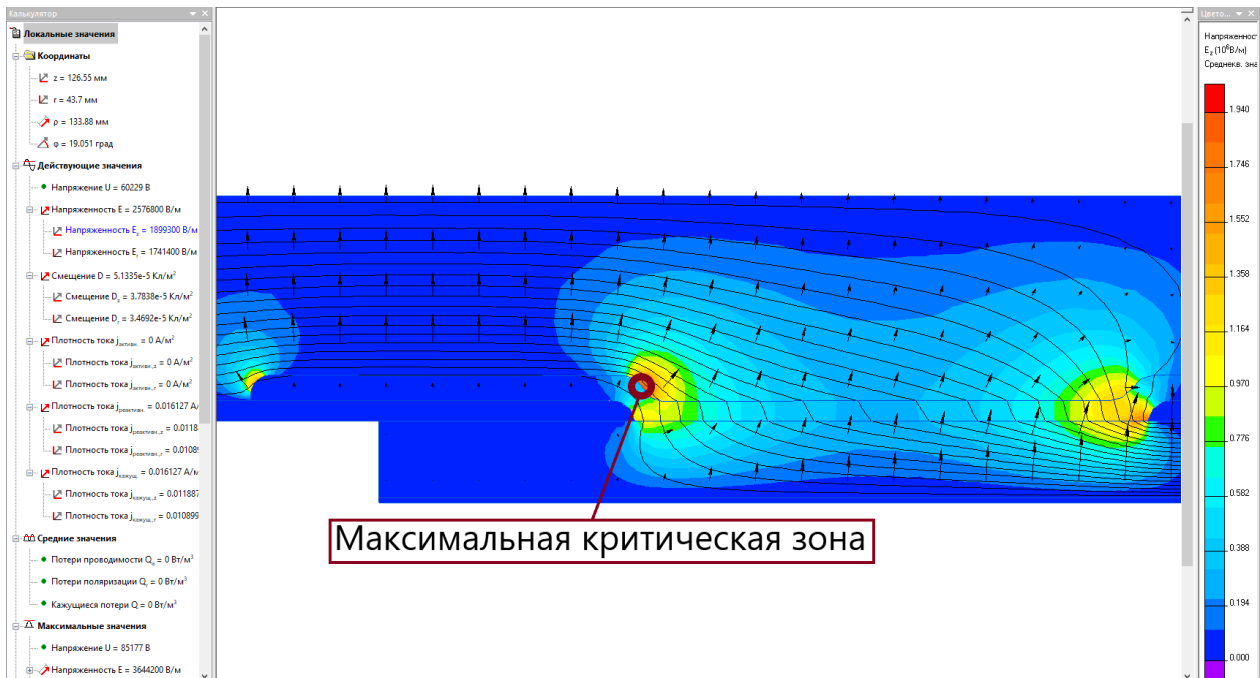


Рисунок 35 картина распределения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в модели трубки-регулятора типа "Г.В."

Основные конструктивные особенности модели трубки-регулятора типа «Г.В.» приведены на рисунке 36.

Электропроводность п/В и диэлектрическая проницаемость ДЭ осталась такая же, как и в первоначальной модели.

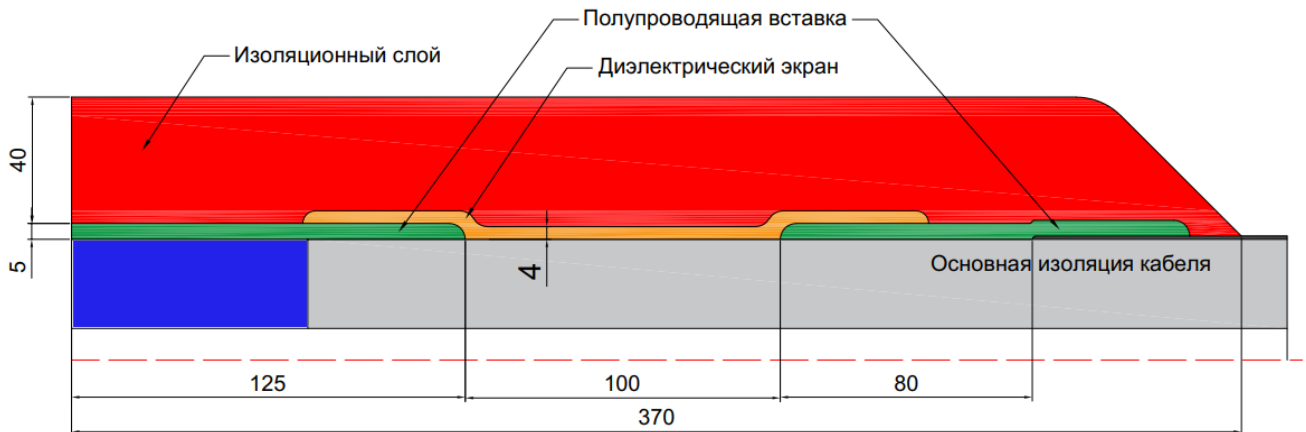


Рисунок 36 Итоговая конструкция модели «Г.В.» с размерами.

Конструктивные особенности разработанной модели типа «Д.С.» показаны на рисунке 37.

Значение электропроводности п/В и значение диэлектрической

проницаемости диэлектрического экрана равна значениям аналогичных элементов в первоначальной конструкции;

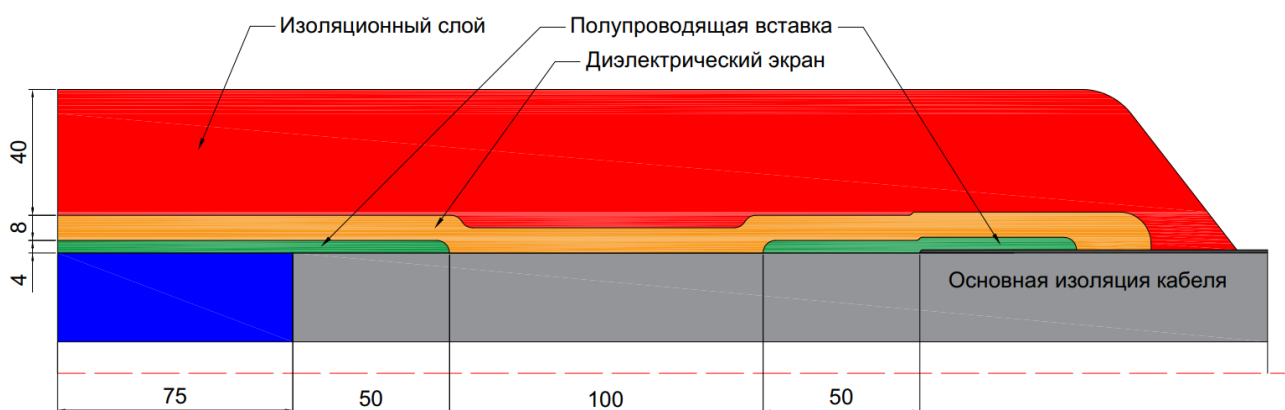


Рисунок 37 Итоговая конструкция модели «Д.С.» с размерами.

По аналогии с исследованием первоначального варианта трубки-регулятора были проведены следующие работы:

- Определены критические зоны в конструкциях;
- Получены максимальные значения тангенциальной и суммарной составляющей напряженности электрического поля в критических зонах;
- Проверена работоспособность конструкций при нарушении процесса монтажа (таблица 12). Для примера на рисунке 38 приведена картина распределения силовых линий в случае уменьшения длины диэлектрического экрана на 50 мм в модели Г.В. и в случае сближения диэлектрических экранов до 20 мм для модели Д.С. (рисунок 39)

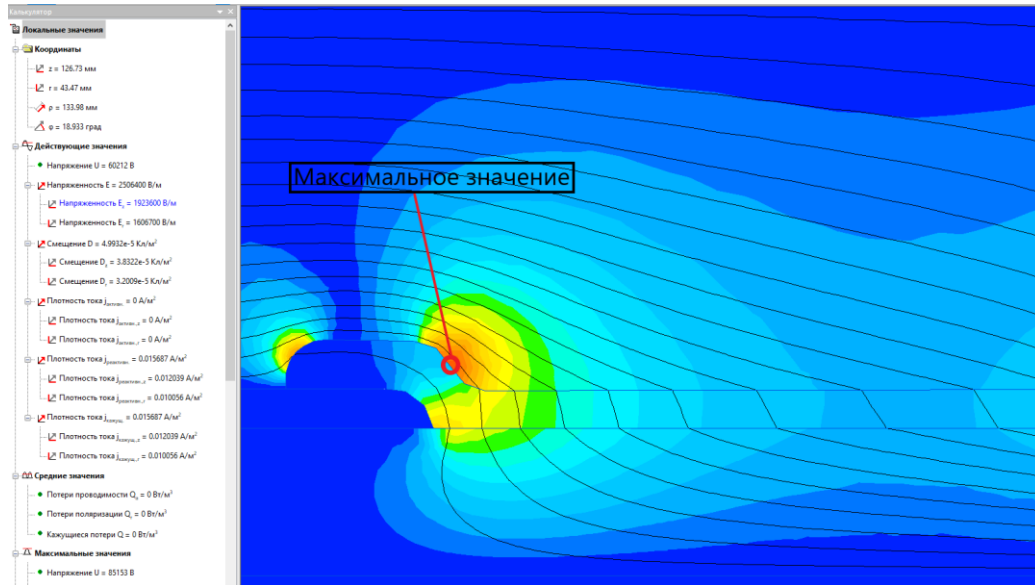


Рисунок 38 Картина распределения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в модели Г.В. вблизи края диэлектрического экрана, в случае уменьшения его длины на 50 мм

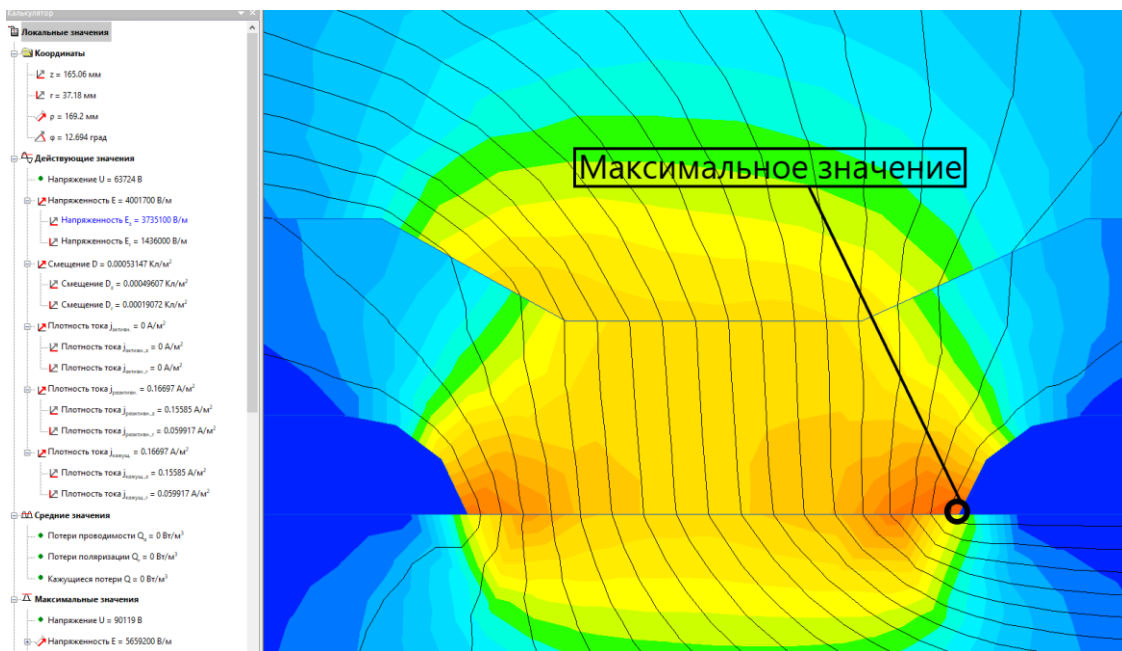


Рисунок 39 Картина распределения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в модели Д.С. вблизи краёв п/пВ в случае, когда расстояние между ними равно 20 мм

Таблица 12: Результаты, полученные в ходе моделирования нарушения геометрических параметров моделей

Модель	Тип изменения	Максимальное значение E_t до изменения параметра, кВ/мм	Значение E_t после изменения в крит.зоне, кВ/мм	Соотношение полученных значений
Г.В.	Увеличение длины п/пВ	1.94	3.8	1.96
	Уменьшение длины п/пВ		1.83	0.94
	Уменьшение длины ДЭ		1.92	0.99
Д.С.	Увеличение длины п/пВ	1.89	3.75	1.98
	Уменьшение длины п/пВ		2.08	1.1

В конце исследования было проведён сравнительный анализ первоначальной конструкции с моделями «Д.С.» и «Г.В.». Максимальные значение напряженностей поля указаны в таблице 13.

Таблица 13: максимальные значения напряженности поля E в каждой из разработанных конструкций

Конструкция	E_{Σ} , кВ/мм	E_t , кВ/мм
Первоначальная	3.64	3.62
Г.В.	3.01	1.94
Д.С.	2.01	1.89

Основные выводы и результаты работы

В ходе диссертационной работы была получена оптимальная конструкция стресс-конуса соединительной муфты, проведён анализ с существующими аналогами. По полученным данным была разработана начальная концепция по разработке усиливающей изоляции муфт на основе термоусаживаемого полиэтилена. Получена начальная модель трубки-регулятора, проведена полная оптимизация геометрических и физических параметров. Проведены исследования по получению композиционных материалов на основе полиэтилена с заданными свойствами. Проведены предварительные испытания макета и сделаны выводы и даны рекомендации для дальнейшего улучшения конструкции. Были разработаны две обновлённые модели, и проведен сравнительный анализ с первоначальной конструкцией трубки-регулятора.

По результатам данной диссертационной работы можно выделить следующие основные выводы:

- Удельная проводимость диффлектора и высоковольтного электрода, должна быть не менее $2 \cdot 10^{-4}$ См/м;
- Полимерный высоковольтный электрод должен быть длиннее соединительной гильзы минимум на 10 мм. В случае нарушения данного условия, произойдёт резкий скачок поля у поверхности высоковольтного электрода. Если же край соединительной гильзы выступит за высоковольтный электрод, то образуется новая критическая Зона 4, где значение напряженности поля будет значительно больше, чем в остальной части конструкции;
- Угол наклона диффлектора следует делать минимально возможным (критерий - технология изготовления);
- По анализу литературных данных для увеличения электропроводности композиционного материала на основе полиэтилена в качестве наполнителя особый интерес представляют одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ). Для облегчения процесса диспергирования и введения одностенных углеродных наночастиц предлагается использовать концентраты трубок фирмы OCSiAl

(«мастербатчи» TUBALL™ MATRIX);

- Проведение исследований по увеличению теплопроводности композита на основе полиэтилена показал, что при добавлении 15% массовых долей теплопроводность композиционного материала увеличилась практически в 2 раза относительно чистого полиэтилена. Для ещё лучшего эффекта рекомендуется производить в процессе внедрения частиц их переориентацию ортогонально поверхности материала;
- Добавление углеродных нанотрубок в количестве 2% от общей массы модифицированного полиэтилена позволило увеличить значение диэлектрической проницаемости материала до 7.36;
- Использование спектрально-корреляционного метода позволило проверить концентрацию и равномерность распределения углеродных нанотрубок в композиционном материале на основе полиэтилена;
- Предварительные испытания макета показали возможность разработки усиливающей изоляции муфты на основе полиэтилена;
- Для успешной работы трубки-регулятора необходимо: использовать компаунды, для заполнения полостей; отказаться от использования лент; использовать элементы трубки большой длины для снижения вероятности появления воздушной полости между слоями во время усадки «внахлест», и для снижения вероятности нарушения толщины элементов конструкции.

В целях снижения уровня частичных разрядов и исключения пробоя соединительной муфты в виде трубки-регулятора рекомендуется в дальнейшем:

- применять болтовые соединители с внешним диаметром, соответствующим диаметру токопроводящей жилы, для исключения использования ещё одного слоя подмотки. Либо проводить зачистку изоляции на конус при установке соединительной гильзы;

- места примыкания гильзы к изолированной жиле и болтовой соединитель заполнять компаундом с полупроводящими свойствами, для исключения воздушных промежутков;
- применять длинные полупроводящие трубки и диэлектрические экраны, перекрывающие место установки соединительной гильзы, чтобы исключить возникновение воздушных промежутков.

Исследования обновлённых конструкций трубки-регулятора показало:

- Даже значительное отклонение геометрических параметров элементов конструкции от заданной, не приводит к увеличению значения напряженности электрического поля в критических зонах до величин, делающих конструкцию многофункционального элемента неработоспособной;
- При некоторых изменениях геометрических параметров, максимальное значение E_t получилось несколько меньше базового. Но взять эти геометрические параметры за основу нет возможности, потому как в случае их отклонения от заданных значений, в конструкции может произойти критическое изменение напряженности поля, вплоть до пробивных значений;
- Главное в процессе монтажа не нарушить порядок усадки элементов конструкции. Так же важно, чтобы внешние слои полностью усаживались на нижние, без «выступов»;

По результатам проведённых исследований новых конструкций можно сказать, что данные модели являются лучшей альтернативой первоначальному варианту.

Список литературы

1. Raicevic, N, Aleksic, S, "Electric field regulation at the cable accessories using one new numerical approach," *Acta Electrotechnica et Informatica*, Том 7, Выпуск 1, 2007. — с. 1-8.
2. Грешняков, Г В, Дубицкий, С Д, Ковалёв, Г Г, Коровкин, Н В, "Электромагнитный и тепловой расчет токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов," *Кабели и провода*, Выпуск 3(340), 2013. — с. 15-21.
3. Грешняков, Г В, Селезнёв, Д А, Ковалёв, Г Г, "Соединительная муфта для силового кабеля," Патент на полезную модель 184107, октября 16, 2018.
4. Котов, Р В, "Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки," *Электро*, Выпуск 5, 2006. — с. 40-44.
5. Wang, X, Wang, C.C, Wu, K, Tu, D.M, "An improved optimal design scheme for high voltage cable accessories," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Том 21(1), 2014. — с. 5-15.
6. Коровкин, Н В, Грешняков, Г В, Дубицкий, С Д К вопросу о проектировании кабельной арматуры для XLPE-кабельных систем высокого напряжения // Повышение эффективности энергетического оборудования. — СПб, 13-15 ноября 2012.
7. Грешняков, Г В, Ковалёв, Г Г, Дубицкий, С Д, "Патент на полезную модель «Концевая муфта силового кабеля с пластмассовой изоляцией," 160436, февраля 20, 2016.
8. Greshnyakov, G., Dybitsky, S., Korovkin, N., "Optimizathion of Capacitive and Resistive Field Grading Devices for Cable Joint and Termination," *International Journal of Energy*, Выпуск 9, 2015. — с. 24-30.
9. Грешняков, Г В, Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик XLPE-кабельных систем среднего и высокого напряжения, 2018, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.

10. Christen, T, Donzel, L, Greuter, F, "Nonlinear resistive electric field grading part1: Theory and simulation," *IEEE Electr.Isul.Mag*, Том 27, Выпуск 1, March/April 2011.
11. Vivo, B D, Spagnuolo, G, Vitelli, M, "Variability Analysis of Composite Materials for Stress Relief in Cable Accessories," *IEEE Trans. Magnet.*, Том 40, 2004. — с. 418-425.
12. Бузлаев, А В, Глушкин, С В, "Электропроводящая полимерная композиция," 664972, августа 23, 2018.
13. Yamanaka, S, Fukuda, T, "Effect of Filler Concentration on Electrical Conductivity and Ultra Low-frequency Dielectric Properties," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Том 2, 1995. — с. 54-61.
14. Селезнёв, Д А Исследование конструкции стресс конуса соединительной кабельной муфты // Неделя науки. — СПб, 2014.
15. Селезнёв, Д А Некоторые аспекты использования резистивно-емкостного метода выравнивания электрического поля в высоковольтной кабельной муфте // Неделя науки. — СПб, 2016.
16. Селезнёв, Д А, Грешняков, Г В, Коровкин, Н В, "Регулирование электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт высокого напряжения," *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета*, Выпуск 4, 2016. — с. 116-125.
17. Seleznev, D, Obraztsov, N, Kiesewetter, D Numerical Simulation of the High-Voltage Cable Sleeve Operation for 110 kV // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. — SPb, 2018.
18. Электрические свойства полимеров / Блайт, Э Р, Блуд, Д; Шевченко В.Г. — М. ФИЗМАТЛИТ, 2008. — с. 376.
19. Heerger, A. J., "Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials (nobel lecture)," *Angewandte Chemie International Edition*, Том 14, Выпуск 40, 2001. — с. 2591-2611.

20. Amoabeng, D., Velankar, S. S., "A Review of Conductive Polymer Composites Filled With Low Melting Point Metal Alloys," *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE.*, Выпуск 58, 2018. — с. 1010-1019.
21. Al-Saleh, M. H., Sundararaj, U., Gelves, G.A., "Carbon nanofiber/polyethylene nanocomposite: Processing behavior, microstructure and electrical properties," *Materials and Design.*, Том 52, 2013. — с. 128-133.
22. Han, Z., Fina, A., "Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes and their Polymer Nanocomposites," *A Review. Prog. Polym. Sci.*, Том 36, 2011. — с. 914-944.
23. Dang ZM, Yuan JK, Yao SH et al, "Flexible nanodielectric materials with high permittivity for power energy storage," *Adv Mater*, Том 25, Выпуск 44, 2013. — с. 6334–6365.
24. Rao Y, Wong CP, "Material characterization of a high-dielectric-constant polymerceramic composite for embedded capacitor for RF applications," *J Appl Polym Sci*, Том 92, Выпуск 4, 2004. — с. 2228–2231.
25. P.Barber, S.Balasubramanian, Y.Anguchamy, S.Gong et all, "Polymer Composite and Nanocomposite Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage," *Materials*, Том 2, 2009. — с. 1697-1733.
26. Suryakanta Nayak, Rakesh Manna, M. Rahaman, Tapan Kumar Chaki, Dipak Khastgir. (2014) Polymer-ceramic composites with controlled dielectric properties: Investigation on electrical & mechanical properties and modeling.
27. Carthy, DN., Risse, S., Katekomol, P., Kofod, G., "The effect of dispersion on the increased relative permittivity of TiO₂/SEBS composites," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Том 42, 2009. — с. 145406-145413.
28. S.Luo, Y.Shen, S.Yu, Y. Wan et all, "Construction of a 3D-BaTiO₃ network leading to significantly enhanced dielectric permittivity and energy storage density of polymer composites," *Energy Environ*, Том 10, 2017. — с. 137-144.