

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

Институт	Энергетический
Направление подготовки	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Кафедра	Электроэнергетических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ЭКМ
_____ Гарганеев А.Г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2В	Студеникину Владиславу Андреевичу

Тема работы:

Разработка огнестойкого кабеля на основе полимерных композиционных материалов, содержащих полимерную основу и наполнитель	
Утверждена приказом директора № 343/с	25.01.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Учебные пособия $U_n=10\text{кВ}$, $P=200\text{кВт}$
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение Огнестойкие силовые кабеля (конструкции и материалы) Способы обеспечения огнестойкости полимерных материалов (Понятие “огнестойкости” и методы испытаний, принципы, механизмы обеспечения огнестойкости) Современные композиционные материалы, содержащие полимерную основу и наполнитель (Возможности использования композиционных материалов в качестве “огненных барьеров”) Электрический расчет Тепловой расчет силового кабеля

	Заключение Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность
Перечень графического материала	Конструкция

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Трофимова Маргарита Николаевна
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шуликин Сергей Николаевич	к. т. н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2В	Студеникин В.А.		

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, где без высокотехнологичного оборудования уже трудно представить какое-либо крупное производство, в интересах технического прогресса создаются и совершенствуются все новые инструменты. Каждый день приносит в нашу жизнь какое-то новое техническое достижение. Все вокруг становится более эргономичным, удобным, компактным, эффективным, более мощным. Этот прогресс касается абсолютно всех сфер деятельности, а также влияет на требования к электромагистралям, передающим для этого оборудования энергию.

Многообразие электрических проводов обусловлено разнообразием целей, для которых они предназначены. Если выделять большие группы, то необходимо сказать в первую очередь о силовых кабелях. Они передают энергию на промышленные объекты, транспортные коммуникации и в жилые дома.

Силовые кабели и кабельные линии служат для распределения электрической энергии при напряжении промышленной частоты и при постоянном напряжении.

Современное технологическое оборудование, мощная испытательная база предприятий обеспечивают выпуск качественных кабельно-проводниковых изделий с различными видами изоляции: бумажно-пропитанной, резиновой, из ПВХ пластиката, сшитого полиэтилена, фторопластовых пленок, стеклонитей, эмальлаков, других современных материалов.

Разработка огнестойкого силового кабеля, на основе полимерных композиционных материалов, с повышенной токовой нагрузкой является актуальной задачей.

Цель дипломной работы – разработка огнестойкого кабеля на основе полимерных композиционных материалов, содержащих полимерную основу и наполнитель.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих конструкций огнестойких кабелей;
2. Выполнить обзор современных огнестойких композиционных материалов;
3. Разработать конструкцию огнестойкого кабеля с огненным барьером на основе огнестойкого композита;
4. Выполнить электрический и тепловой расчет разработанного кабеля для заданных значений мощности и напряжения;
5. Оценить степень влияния изменения толщин огненных барьеров на величину номинального тока;

Объектом исследования в работе являются силовые кабели.

Предметом исследования полимерные композиционные материалы, содержащие полимерную основу и наполнитель.

В процессе написания дипломной работы были использованы труды специалистов: Ларина Э. Т., Привезенцев В. А. и других.

ГЛАВА I ОГНЕСТОЙКИЕ СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ

1.1 Конструкция

Кабель – это провод с общей герметизированной изоляцией, защищающей одну или несколько отдельных изолированных жил. Оболочка кабеля выполняется из резиновых, пластмассовых материалов или алюминиевых, свинцовых сплавов. Поверх этой изоляции дополнительно может применяться броня. Бронирование кабелей производится посредством обмотки стальными

лентами, круглой, иногда плоской проволокой. Применяются такие кабели в местах, где вероятно их механическое повреждение.

Силовые кабели используются для передачи электроэнергии на расстояние, в мощных осветительных и силовых установках, при выполнении кабельных линий; производятся как с медной, так и с алюминиевой сердцевиной, в бумажной, полиэтиленовой, резиновой, ПВХ, и другой изоляции с применением наружных бронированных оболочек.

Изоляция на основе слюды имеет класс нагревостойкости В (до 130°C). Слюда имеет очень высокую электрическую прочность (при определенной ориентации электрического поля относительно кристаллической структуры), обладает стойкостью к воздействию частичных разрядов и высокой нагревостойкостью. Благодаря этим свойствам, слюда является незаменимым материалом для изоляции статорных обмоток крупных вращающихся машин. Основными исходными материалами служат микалента или стеклослюдаинитовая лента.

Микалента представляет собой слой пластинок слюды, скрепленных лаком между собой и с подложкой из специальной бумаги или стеклоленты. Микалента используется в, так называемой, компаундированной изоляции, процесс изготовления которой включает намотку нескольких слоев микаленты, пропитку их при нагреве под вакуумом битумным компаундом и опрессовку. Эти операции повторяются для каждого пяти-шести слоев до получения изоляции необходимой толщины. Компаундированная изоляция используется в настоящее время в машинах малой и средней мощности.

Более совершенной является изоляция, выполняемая из стеклослюдаинитовых лент и термореактивных пропиточных составов. Слюдаинитовая лента состоит из одного слоя слюдинитовой бумаги толщиной 0,05 мм и одного или двух слоев подложки из стеклоленты толщиной 0,05 мм. Такая композиция обладает достаточно высокой механической прочностью (за счет подложек) и отмеченными выше качествами, характерными для слюды.

Трубки электротехнические **бумажно-бакелитовые** Камкор-Э применяются для защиты силовых кабелей (низкого и высокого напряжений до 10 кВ) и сетей передачи информации (электрических и оптоволоконных) от различных повреждений и воздействия окружающей среды. Использование Камкор-Э, учитывая их экологичность, также обеспечивает защиту грунта и корневых систем растений от продуктов распада кабельной изоляции и химических процессов, образуемых вокруг кабельных линий, проложенных в земле. Использование характерно: при прокладке под землей; в бетонных элементах строительных конструкций; на участках с высокими показателями химической агрессивности среды; в конструкции предусмотрена протяжка. Трубы изготавливаются с наружным красным цветом (цвет предупреждающий об опасности) и внутренним белым / черным. Степень защиты IP 45/55 по ГОСТ 14245-96. Электротехнические трубы Камкор-Э выпускаются двух видов: однослойные и двуслойные.

Силовой кабель – это кабель предназначенный для передачи электрической энергии.

Основными элементами кабелей являются токопроводящие жилы, изоляция, влагозащитная оболочка.

Токопроводящие жилы- предназначены для направления потока ЭМ энергии били информации.

Для токопроводящих жил используется медная, алюминиевая и стальная проволока, а также проволока из сплавов низкого и высокого сопротивления.

Основные требования к материалам токопроводящих жил: высокие электропроводность, механические характеристики и коррозионная стойкость, а также технологичность, экономичность и недефицитность. Высокая электропроводность и размер (площадь сечения) жил — это параметры, которые оказывают решающее влияние на допустимый ток нагрузки при передаче энергии или на затухание сигналов (потери) в информационных кабелях

Изоляция - предназначена для создания электрически прочного диэлектрического промежутка между токопроводящими жилами и между жилами и другими заземленными элементами. Кроме того, очень часто изоляция должна обладать большой геометрической стабильностью размеров, что важно для кабелей связи, особенно радиочастотных. Материал, толщина и форма изоляции определяют максимальное значение рабочего напряжения данного кабельного изделия.

Защитная оболочка - предназначена для защиты всех элементов кабелей от механических, климатических и химических воздействий.

Влагозащитные оболочки предотвращают проникновение влаги внутрь изоляции; пластмассовыми (из полиэтилена и поливинилхлоридного пластика).

1.2 Материалы

В качестве токопроводящей жилы кабеля используется медная катанка.

Медь – металл красноватого цвета, обладает целым рядом технически ценных свойств:

- 1) Малое удельное электрическое сопротивление $1.720 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.
- 2) Высокая механическая прочность 1540 МПа.
- 3) Хорошая способность к пайке и сварке.

Медь по химическому составу подразделяется на: М1, ММ, М00к, М0к, М0ку, М00б, М0б, М1б, М1у, М1к, М1ф, М1р.

В данном кабеле используется медь марки ММ, М1

Слюдаинит.

Термический барьер поверх медной жилы из слюдосодержащей ленты.

Слюдаинит - материал, получаемый из слюдинитовой бумаги, пропитанной различными связующими материалами.

К листовым слюдинитам относятся:

- коллекторный, получаемый горячим прессованием слюдинитового картона, содержащего вязкую смолу, применяется в качестве изоляционных прокладок между пластинами коллекторов электрических машин;
- формовочный, изготавливается из одного или двух слоев слюдинитовой бумаги и стеклоткани, пропитанной лаком с последующим горячим прессованием, применяется в пазовой изоляции и для прокладок длительной нагревостойкости при 300°C;
- гибкий, получается из нескольких слоев слюдинитовой бумаги, пропитанных и склеенных электроизоляционными лаками с последующим горячим прессованием, применяется в пазовой и межвитковой изоляции электрических машин.

К **рулонным слюдинитам** относятся:

- слюдинитофольй, получаемый из одного слоя слюдинитовой бумаги с подложкой из лавсановой бумаги, пропитанной лаком;

- слюдинитовые ленты, состоящие из одного, иногда двух слоев слюдинитовой бумаги с одно или двусторонней стекловолокнуистой подложкой (в некоторых случаях одна из подложек может быть полимерная).

Слюдинитовые ленты бывают пропитаны соответствующими лаками и компаундами либо сухие, изготовленные с небольшим количеством клеящего материала, не пропитывающего слюдинитовую бумагу или подложку. Слюдиниты равномерные по толщине, обладают повышенной и более равномерной электрической прочностью, имеют меньшую механическую прочность и влагостойкость по сравнению с миканитами.

Слюдопласты - материалы из слюдопластовой бумаги.

При изготовлении слюдопластовой бумаги используют свойства чистых поверхностей кристаллов природной слюды.

Слюдопласты обладают большей механической прочностью чем слюдиниты, а по структуре подходят к миканитам.

Полиэтилен.

Изоляции проводов и кабелей, выполненной из термопластичных материалов, присущи некоторые недостатки, предопределяемые самой природой термопластов, главными из которых являются ползучесть и резкое ухудшение механических свойств при температурах, близких к температуре плавления, вплоть до полной потери формоустойчивости. Кроме того, внутренние напряжения, «замороженные» в изоляции при её изготовлении, проявляют себя при повышенных рабочих температурах, приводя к заметной усадке а в ряде случаев и растрескиванию изоляции. Ввиду того на практике часто не используется в полной мере нагревостойкость термопластичной изоляции, так как потребители иногда предпочитают снизить допустимую рабочую температуру с целью облегчить условия эксплуатации и получить благодаря этому запас по надёжности.

Для того чтобы наложить изоляцию на медные токопроводящие жилы применяется.

ГЛАВА II СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Понятие «огнестойкости» и методы испытаний

Огнестойкий кабель – это кабель, который продолжает действовать в течение определенного времени под воздействием открытого огня. Огнестойкость кабеля обеспечена термически устойчивым лентами из слюды, не распространяющих горение на жилы, изоляцией из термоустойчивых материалов (кремний, силикон), ПВХ оболочками пониженной горючести или не содержащими галогенов.

На сегодняшний день огнестойкие кабели востребованы во многих местах эксплуатации в связи с возросшими требованиями пожарной безопасности, регламентируемыми ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и ГОСТ Р 53315-2009 «Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности». См. Приложение 6 Если ранее огнестойкие кабели прокладывали в метрополитенах, АЭС, военных объектах, то теперь огнестойкие кабели используют более широко: в местах скопления людей (торговые комплексы, бизнес-центры) в системах безопасности, для систем охранно-пожарной сигнализации.

В ГОСТ Р 53315-2009 дано понятие огнестойкости, выделены классы пожарной безопасности для кабеля и типы исполнения огнестойких кабелей.

Огнестойкость кабеля - способность кабеля поддерживать рабочее состояние под воздействием открытого огня в течение определенного времени. В кабельной маркировке огнестойкость обозначается индексом - FR (fire resistance)

Огнестойкость кабеля можно охарактеризовать двумя показателями: *предел распространения горения* и *предел пожаростойкости* (ГОСТ Р 53315—2009). в соответствии с НПБ 242-97 *предел распространения горения* - максимальное расстояние от источника горения в зоне действия пламени, а *предел пожаростойкости* - время, в течении которого кабель должен функционировать под воздействием пламени. Чаще всего в испытательных лабораториях проверяются именно они. Из-за не полной оборудованности лабораторий такие

важные показатели как показатель коррозионной активности, дымообразования, токсичности не всегда измеряются.

Определить огнестойкость кабеля можно только в лабораторных условиях, где проводятся испытания. Например, показатель предела пожаростойкости кабеля определяется в специальной камере, где горизонтально расположенный опытный образец, под напряжением подвергается нагреву от газовой горелки в 750 С определенное время. Работоспособность кабеля определяется временем свечения лампы, к которой подключен образец или показанием датчика. Полная методика испытания представлена в ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003. Время работоспособности кабеля и будет являться значением показателя предела пожаростойкости.

Предел распространения горения также определяется лабораторно. Суть метода испытания заключается в следующем. Опытный образец располагается вертикально в специальной камере, под ним под определенным углом ставят горелку и подвергают воздействию пламени в течение установленного времени. После испытания замеряют длину обуглившейся части. Полная методика испытания представлена в ГОСТ Р МЭК 60332-2-2-2007. Представленные методики не единственные и их существует более 20.

В соответствии с рассмотренными выше показателями выделяют различные классы кабельных линий по пожарной безопасности: ПРГ1, ПРГ2 - предел распространения горения ограничен зоной источника горения, либо происходит по всей длине, а также ПО1, ПО2, ПО3, ПО4, ПО5, ПО6, ПО – предел пожаростойкости варьируется от 30 и менее до 180 минут.

Обычно необходимую огнестойкость кабеля определяют еще на этапе проектирования. Предел пожаростойкости определяется по расчету времени эвакуации из здания - для высотных зданий очевидно время эвакуации больше, чем для малоэтажных, поэтому предел пожаростойкости кабельной линии в высотках должен быть выше, например не менее 90-180 минут.

2.2 Принципы, механизмы обеспечения огнестойкости

22 июля 2008 г. был принят Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», п.п.2 статьи 82 которого гласит: «кабели и провода систем противопожарной защиты, средств обеспечения деятельности подразделений пожарной охраны, систем обнаружения пожара, оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, аварийного освещения на путях эвакуации, аварийной вентиляции и противодымной защиты, автоматического пожаротушения, внутреннего противопожарного водопровода, лифтов для транспортирования подразделений пожарной охраны в зданиях, сооружениях и строениях должны сохранять работоспособность в условиях пожара в течение времени, необходимого для полной эвакуации людей в безопасную зону». При пожаре могут работать только специальные кабели – огнестойкие, они обозначаются символом «FR». В стандартах на проведение испытаний (ГОСТ ИЕС 60331-21–2011, ГОСТ ИЕС 60331-23–2011) указаны следующие требования к огнестойким кабелям: кабель должен продолжать выполнять заданные функции при воздействии источника пламени температурой не менее 750°C, а также после воздействия пламени. Время воздействия пламени может быть любым, оно выбирается и указывается в документации производителем кабеля самостоятельно, но стандарт рекомендует время – не менее 90 минут. Поэтому потребитель может сравнивать кабели – чем выше допустимое время воздействия пламени и его температура, тем кабель обладает лучшей огнестойкостью. 01 января 2014 г. в РФ был введен межгосударственный стандарт ГОСТ 31565–2012 «Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности», в котором кабели классифицируются по показателям пожарной опасности, к ним предъявляются требования пожарной безопасности и приводятся области применения с учетом их типа исполнения. В данном ГОСТ указывается, что огнестойкие кабели исполнения нг-FRLS и нг-FRHF должны применяться «для одиночной или групповой прокладки цепей питания электроприемников систем противопожарной защиты, а также других

электроприемников, которые должны сохранять работоспособность в условиях пожара». Современные производители представляют огнестойкие кабели следующих типов: 1. Кабели со стеклослюденой изоляцией. На токопроводящую жилу накладывается термический барьер в виде обмотки из слюдосодержащих лент. Поверх обмотки накладывается изоляционный слой из материала, не распространяющего горение (например, ПВХ или полимерная композиция). При пожаре изоляционный слой выгорает, но кабель сохраняет работоспособность, так как слой слюды на токопроводящих жилах предохраняет от короткого замыкания. Основным недостатком данного способа является трудность наложения обмотки из слюдосодержащих лент на жилу и необходимость применения специального оборудования для наложения ленты. Преимуществом данного способа является максимальная стойкость к возможным механическим и вибрационным нагрузкам на кабель при пожаре (возникающим, например, при тушении). Необходимо отметить, что в силовых кабелях согласно нового ГОСТ 31996-2012 допускается использовать только этот способ обеспечения огнестойкости. 2. Кабели с изоляцией из кремнийорганической резины. Изоляция токопроводящих жил выполняется из специальной резины, в состав которой введен керамонаполнитель. При пожаре резина сгорает, образуя вокруг жилы твердый изолирующий керамический слой («керамическую изоляцию»). При производстве кабеля кремнийорганическая резина накладывается на жилу с помощью экструдера как обычная резина. Так как процесс экструзии осуществляется с высокой скоростью, то производство огнестойких кабелей становится гораздо более экономичным, чем при использовании стеклослюдосодержащих лент. Другим недостатком изоляции из кремнийорганической резины является ее нестойкость к воздействию радиации (радиационная стойкость – обязательное условие применения кабеля внутри гермозоны АЭС). Для повышения радиационной стойкости в кабеле необходимо применять специальную полиамидную пленку, которая накладывается поверх кремнийорганической изоляции жилы.

ГЛАВА III СОВРЕМЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ПОЛИМЕРНУЮ ОСНОВУ И НАПОЛНИТЕЛЬ

3.1 Возможности использования композиционных материалов в качестве «огненных барьеров» в силовых кабелях.

Композиционные материалы – материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жесткостью и т.д. Соединение разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Изменяя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр материалов с требуемым набором свойств. Некоторые композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче. Использование композитов обычно позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении ее механических характеристик.

Основными составляющими композитов самые разнообразные материалы – металлы, керамика, стекла, пластмассы, углерод и т.п. Известны многокомпонентные композиционные материалы – полиматричные, когда в одном материале сочетают несколько матриц, или гибридные, включающие в себя разные наполнители. Наполнитель определяет прочность, жесткость и деформируемость материала, а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям.

По структуре композиты делятся на несколько основных классов: волокнистые, слоистые, дисперсноупрочненные, упрочненные частицами и нанокомпозиты. Волокнистые композиты армированы волокнами или нитевидными кристаллами. Уже небольшое содержание наполнителя в композитах такого типа приводит к появлению качественно новых механических

свойств материала. Широко варьировать свойства материала позволяет также изменение ориентации размера и концентрации волокон. Кроме того, армирование волокнами придает материалу анизотропию свойств (различие свойств в разных направлениях), а за счет добавки волокон проводников можно придать материалу электропроводность вдоль заданной оси.

Микроструктура остальных классов композиционных материалов характеризуется тем, что матрицу наполняют частицами армирующего вещества, а различаются они размерами частиц. В композитах, упрочненных частицами, их размер больше 1 мкм, а содержание составляет 20–25% (по объему), тогда как дисперсноупрочненные композиты включают в себя от 1 до 15% (по объему) частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм. Размеры частиц, входящих в состав нанокompозитов – нового класса композиционных материалов – еще меньше и составляют 10–100 нм.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ). Композиты, в которых матрицей служит полимерный материал, являются одним из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Их применение в различных областях дает значительный экономический эффект. Например, использование ПКМ при производстве космической и авиационной техники позволяет сэкономить от 5 до 30% веса летательного аппарата. А снижение веса, например, искусственного спутника на околоземной орбите на 1 кг приводит к экономии 1000\$. В качестве наполнителей ПКМ используется множество различных веществ.

Стеклопластики – полимерные композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами, которые формуют из расплавленного неорганического стекла. В качестве матрицы чаще всего применяют как термореактивные синтетические смолы (фенольные, эпоксидные, полиэфирные и т.д.), так и термопластичные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полистирол и т.д.). Эти материалы обладают достаточно высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами, кроме того, они прозрачны для радиоволн. Использование стеклопластиков началось в конце

Второй мировой войны для изготовления антенных обтекателей – куполообразных конструкций, в которых размещается антенна локатора. В первых армированных стеклопластиках количество волокон было небольшим, волокно вводилось, главным образом, чтобы нейтрализовать грубые дефекты хрупкой матрицы. Однако со временем назначение матрицы изменилось – она стала служить только для склеивания прочных волокон между собой, содержание волокон во многих стеклопластиках достигает 80% по массе. Слоистый материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, плетенная из стеклянных волокон, называется стеклотекстолитом.

Стеклопластики – достаточно дешевые материалы, их широко используют в строительстве, судостроении, радиоэлектронике, производстве бытовых предметов, спортивного инвентаря, оконных рам для современных стеклопакетов и т.п.

Углепластики – наполнителем в этих полимерных композитах служат углеродные волокна. Углеродные волокна получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д. Для изготовления углепластиков используются те же матрицы, что и для стеклопластиков – чаще всего – термореактивные и термопластичные полимеры. Основными преимуществами углепластиков по сравнению со стеклопластиками является их низкая плотность и более высокий модуль упругости, углепластики – очень легкие и, в то же время, прочные материалы. Углеродные волокна и углепластики имеют практически нулевой коэффициент линейного расширения. Все углепластики хорошо проводят электричество, черного цвета, что несколько ограничивает области их применения. Углепластики используются в авиации, ракетостроении, машиностроении, производстве космической техники, медтехники, протезов, при изготовлении легких велосипедов и другого спортивного инвентаря.

На основе углеродных волокон и углеродной матрицы создают композиционные углеграфитовые материалы – наиболее термостойкие композиционные материалы (углеуглепластики), способные долго выдерживать в

инертных или восстановительных средах температуры до 3100°C . Существует несколько способов производства подобных материалов. По одному из них углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой, подвергая затем действию высоких температур (2000°C), при этом происходит пиролиз органических веществ и образуется углерод. Чтобы материал был менее пористым и более плотным, операцию повторяют несколько раз. Другой способ получения углеродного материала состоит в прокаливании обычного графита при высоких температурах в атмосфере метана. Мелкодисперсный углерод, образующийся при пиролизе метана, закрывает все поры в структуре графита. Плотность такого материала увеличивается по сравнению с плотностью графита в полтора раза. Из углеуглепластиков делают высокотемпературные узлы ракетной техники и скоростных самолетов, тормозные колодки и диски для скоростных самолетов и многоразовых космических кораблей, электротермическое оборудование.

Органопластики – композиты, в которых наполнителями служат органические синтетические, реже – природные и искусственные волокна в виде жгутов, нитей, тканей, бумаги и т.д. В терморезистивных органопластиках матрицей служат, как правило, эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы, а также полиимиды. Материал содержит 40–60% наполнителя. Содержание наполнителя в органопластиках на основе термопластичных полимеров – полиэтилена, ПВХ, полиуретана и т.п. – варьируется в значительно больших пределах – от 2 до 60%. Органопластики обладают низкой плотностью, они легче стекло- и углепластиков, относительно высокой прочностью при растяжении; высоким сопротивлением удару и динамическим нагрузкам, но, в то же время, низкой прочностью при сжатии и изгибе.

Важную роль в улучшении механических характеристик органопластика играет степень ориентация макромолекул наполнителя. Макромолекулы жесткоцепных полимеров, таких, как полипарафенилтерефталамид (кевлар) в основном ориентированы в направлении оси полотна и поэтому обладают

высокой прочностью при растяжении вдоль волокон. Из материалов, армированных кевларом, изготавливают пулестойкие бронежилеты.

Органопластики находят широкое применение в авто-, судо-, машиностроении, авиа- и космической технике, радиоэлектронике, химическом машиностроении, производстве спортивного инвентаря и т.д.

Полимеры, наполненные порошками. Известно более 10000 марок наполненных полимеров. Наполнители используются как для снижения стоимости материала, так и для придания ему специальных свойств.

Сейчас применяются разнообразные наполнители как терморезистивных, так и термопластичных полимеров. Карбонат кальция и каолин (белая глина) дешевы, запасы их практически не ограничены, белый цвет дает возможность окрашивать материал. Применяют для изготовления жестких и эластичных поливинилхлоридных материалов для производства труб, электроизоляции, облицовочных плиток и т.д., полиэфирных стеклопластиков, наполнения полиэтилена и полипропилена. Добавление талька в полипропилен существенно увеличивает модуль упругости и теплостойкость данного полимера. Сажа больше всего используется в качестве наполнителя резин, но вводится и в полиэтилен, полипропилен, полистирол и т.п. По-прежнему широко применяют органические наполнители – древесную муку, молотую скорлупу орехов, растительные и синтетические волокна. Для создания биоразлагающихся композитов в качестве наполнителя используют крахмал.

Е) *Текстолиды* – слоистые пластики, армированные тканями из различных волокон. Технология получения текстолидов была разработана в 1920-х на основе фенолформальдегидной смолы. Плотная ткань пропитывали смолой, затем прессовали при повышенной температуре, получая текстолидовые пластины. Роль одного из первых применений текстолидов – покрытия для кухонных столов – трудно переоценить.

Основные принципы получения текстолидов сохранились, но сейчас из них формируют не только пластины, но и фигурные изделия. Связующими в текстолидах является широкий круг терморезистивных и термопластичных

полимеров, иногда даже применяются и неорганические связующие – на основе силикатов и фосфатов. В качестве наполнителя используются ткани из самых разнообразных волокон – хлопковых, синтетических, стеклянных, углеродных, асбестовых, базальтовых и т.д. Соответственно разнообразны свойства и применение текстолитов.

Композиционные материалы с металлической матрицей. При создании композитов на основе металлов в качестве матрицы применяют алюминий, магний, никель, медь и т.д. Наполнителем служат или высокопрочные волокна, или тугоплавкие, не растворяющиеся в основном металле частицы различной дисперсности.

Свойства дисперсноупрочненных металлических композитов изотропны – одинаковы во всех направлениях. Добавление 5–10% армирующих наполнителей (тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов) приводит к повышению сопротивляемости матрицы нагрузкам. Эффект увеличения прочности сравнительно невелик, однако ценно увеличение жаропрочности композита по сравнению с исходной матрицей. Так, введение в жаропрочный хромоникелевый сплав тонкодисперсных порошков оксида тория или оксида циркония позволяет увеличить температуру, при которой изделия из этого сплава способны к длительной работе. Дисперсноупрочненные металлические композиты получают, вводя порошок наполнителя в расплавленный металл, или методами порошковой металлургии.

Армирование металлов волокнами, нитевидными кристаллами, проволокой значительно повышает как прочность, так и жаростойкость металла. Применяют оксидные, боридные, карбидные, нитридные металлические наполнители, углеродные волокна. Керамические и оксидные волокна из-за своей хрупкости не допускают пластическую деформацию материала, что создает значительные технологические трудности при изготовлении изделий, тогда как использование более пластичных металлических наполнителей позволяет переформование. Получают такие композиты пропитыванием пучков волокон расплавами

металлов, электроосаждением, смешением с порошком металла и последующим спеканием и т.д.

Композиционные материалы на основе керамики. Армирование керамических материалов волокнами, а также металлическими и керамическими дисперсными частицами позволяет получать высокопрочные композиты, однако, ассортимент волокон, пригодных для армирования керамики, ограничен свойствами исходного материала. Часто используют металлические волокна. Сопротивление растяжению растет незначительно, но зато повышается сопротивление тепловым ударам – материал меньше растрескивается при нагревании, но возможны случаи, когда прочность материала падает. Это зависит от соотношения коэффициентов термического расширения матрицы и наполнителя.

Армирование керамики дисперсными металлическими частицами приводит к новым материалам (керметам) с повышенной стойкостью, устойчивостью относительно тепловых ударов, с повышенной теплопроводностью. Из высокотемпературных керметов делают детали для газовых турбин, арматуру электропечей, детали для ракетной и реактивной техники. Твердые износостойкие керметы используют для изготовления режущих инструментов и деталей. Кроме того, керметы применяют в специальных областях техники – это тепловыделяющие элементы атомных реакторов на основе оксида урана, фрикционные материалы для тормозных устройств и т.д.

Керамические композиционные материалы получают методами горячего прессования (таблетирование с последующим спеканием под давлением) или методом шликерного литья (волокна заливаются суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию).

Слюдяные материалы.

Слюда является основой большой группы электроизоляционных изделий. Главное достоинство слюды - высокая термостойкость наряду с достаточно высокими электроизоляционными характеристиками. Слюда является природным минералом сложного состава. В электротехнике используют два вида слюд:

мусковит $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ и флогопит $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$. Высокие электроизоляционные характеристики слюды обязаны ее необычному строению, а именно - слоистости. Слюдяные пластинки можно расщеплять на плоские пластинки вплоть до субмикронных размеров. Разрушающие напряжения при отрыве одного слоя от другого слоя составляют примерно 0.1 МПа, тогда как при растяжении вдоль слоя - 200-300 МПа. Достаточно высокую электрическую прочность, более 100 кВ/мм; термостойкость, температура плавления более 1200° С.

Слюда используется в качестве электрической изоляции, как в виде щипаных тонких пластинок, в.т.ч. склеенных между собой (миканиты), так и в виде слюдяных бумаг, в.т.ч. пропитанных различными связующими (слюдиниты или слюдопласты). Слюдяная бумага производится по технологии, близкой к технологии обычной бумаги. Слюда размельчают, готовят пульпу, на бумагоделательных машинах раскатывают листы бумаги. Миканиты обладают лучшими механическими характеристиками и влагостойкостью, но они более дороги и менее технологичны. Слюдиниты – листовые материалы, изготовленные из слюдяной бумаги на основе мусковита. Иногда их комбинируют с подложкой из стеклоткани (стеклослюдинит), или полимерной пленки (пленкослюдинит). Бумаги, пропитанные лаком, или другим связующим, обладают лучшими механическими и электрофизическими характеристиками, чем непропитанные бумаги, но их термостойкость обычно ниже, т.к. она определяется свойствами пропитывающего связующего.

В данной работе рассматривается композиционный полимерный материал с пористой структурой заполненной составом, повышающим огнестойкость в соответствии с патентами N2430138, N2491318.

При этом полимерной основой является перфорированный вспененный полимер, полости которого заполнены наполнителем, содержащим синтетический каучук. Последний обладает огнестойкостью при температурах от 200 до 700°С.

Также в композиции содержится отвердитель и стабилизатор. Наполнитель может дополнительно содержать растворитель, пигменты и антипирены.

В качестве полимерной основы применяется вспененный полиуретан. В качестве полимерной основы возможно использование иных вспененных материалов, однако предметом работы является огненный барьер из вспененного полиуретана.

При изготовлении композитного материала в последнем выполняют перфорацию, обеспечивая площадь перфорированной поверхности в горизонтальном сечении в пределах 15 - 60 процентов. Затем заполняют объем материала при комнатной температуре жидким наполнителем, компоненты которого взяты в следующем отношении (в массовых долях):

Синтетический каучук 82-85

Отвердитель 5-10

Стабилизатор 2-6

Растворитель 0-25

Пигменты 0-6

Антипирены 0-15

Заполненный составом композиционный материал отверждают в течение 24 часов.

Были проведены испытания предложенного Есауловым материала на установке «Луч» при следующих условиях:

- Мощность теплового потока от лучистого источника тепла $q=0,15 - 0,16 \times 10^6$ Вт/м²;
- Все исследуемые образцы имели металлическую подложку из алюминиево-магниевого сплава;
- Время воздействия теплового потока составляло 10-60 с.

Толщина образцов составляла 15 мм. Перфорация на глубину 5 мм.

Испытания выявили потерю массы вспененных материалов в пределах 18 – 60% без добавления состава в поры, 4 – 17% с добавлением наполнителя в поры, в связи с чем можно утверждать о конкурентоспособности пенополиуретана во

вспененном состоянии с добавлением наполнителя в поры против углепластиков и стеклопластиков. Температура подложки, защищаемой композитным материалом не превысила 100°C, что является приемлемой температурой для изоляции рассматриваемого в работе кабеля. Все приведенное свидетельствует о возможности применения вспененного полиуретана с наполнителем в качестве огненного барьера в проектируемом изделии.

ГЛАВА IV РАСЧЁТ МАКСИМАЛЬНОГО ДОПУСТИМОГО ТОКА ОГНЕСТОЙКОГО СИЛОВОГО КАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1 Электрический расчёт

Определим расчетный фазный ток:

$$I_{\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi} = 641.5 \text{ А}$$

где U – напряжение 10 кВ, P – мощность 10 МВт, $\cos \phi$ – коэффициент мощности.

Определим сечение жилы по допустимому току:

$$S_H = \frac{I_{\phi}}{J_{\Theta}} = 206.936 \text{ мм}^2$$

где J_{Θ} – плотность тока.

Принимаем значение сечения ТПЖ $S_{H_p} = 240 \text{ мм}^2$; диаметр проволок 1,2 мм.

Определим толщину изоляции:

$$\Delta_{\text{из}} = \frac{U}{E_{\text{ср}}} \cdot 10^{-3} = 4 \text{ мм}$$

где $E_{\text{ср}} = 2,5 \text{ кВ/мм}$ – средняя напряженность электрического поля.

Определим диаметр ТПЖ:

$$D_{\text{ж}} = 2 \sqrt{\frac{S_{H_p}}{\lambda \cdot \pi}} = 18.741 \text{ мм}$$

где $\lambda = 0.87$.

Зададим толщину внешнего термического барьера $\Delta_{\text{б2}} = 5 \text{ мм}$, а толщину внутреннего в виде диапазона значений:

$$\Delta\delta = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.3 \\ 0.5 \\ 0.8 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ мм}$$

Тогда диаметры по изоляции, барьерам и другим слоям задаются функциями:

$$D_{\delta j} = D_{\text{ж}} + 2\Delta\delta_j$$

$$D_{\text{из}j} = D_{\delta j} + 2\Delta_{\text{из}}$$

$$D_{\text{рс}1j} = D_{\text{из}j} + 2\Delta_{\text{рс}1}$$

$$D_{\text{рс}2j} = D_{\text{рс}1j} + 2\cdot\Delta_{\text{э}} + 2\cdot\Delta_{\text{рс}2}$$

$$D_{\delta 2j} = D_{\text{рс}2j} + \Delta\delta 2_j$$

$$D_{\text{об}j} = D_{\delta 2j} + 2\cdot\Delta_{\text{об}}$$

Подобным образом рассчитаем параметры при фиксированном значении толщины внутреннего барьера, но при изменении толщины внешнего.

$$D_{\delta} := D_{\text{ж}} + 2\Delta\delta$$

$$D_{\text{из}} := D_{\delta} + 2\Delta_{\text{из}}$$

$$D_{\text{рс}1} := D_{\text{из}} + 2\Delta_{\text{рс}1}$$

$$D_{\text{рс}2} := D_{\text{рс}1} + 2\cdot\Delta_{\text{э}} + 2\cdot\Delta_{\text{рс}2}$$

$$D_{\delta 2j} := D_{\text{рс}2} + \Delta\delta 2_j$$

$$D_{\text{об}j} := D_{\delta 2j} + 2\cdot\Delta_{\text{об}}$$

при $\Delta\delta = 1 \text{ мм}$, $\Delta\delta 2_j =$

0
2
3.5
4.5
5

Результаты расчёта сведём в таблицу 1.

Таблица 1 – Диаметры слоев кабеля

	Диаметр жилы, мм	Диаметр по первому термобарьеру, мм	Диаметр по изоляции, мм	Диаметр по разделительному слою 1, мм	Диаметр по разделительному слою 2, мм	Диаметр по второму термобарьеру, мм	Диаметр по оболочке, мм
при фиксированной толщине внутреннего барьера	18,7	20,7	28,7	29,1	31,9	31.9 33.9 35.4 36.4 36.9	37.3 39.3 40.8 41.8 42.3
при фиксированной толщине внешнего барьера	18,7	18.7 19.3 19.7 20.3 20.7	26.7 27.3 27.7 28.3 28.7	27.1 27.7 28.1 28.7 29.1	29.9 30.5 30.9 31.5 31.9	34.9 35.5 35.9 36.5 36.9	40.3 40.9 41.3 41.9 42.3

4.1. Тепловой расчёт (прокладка в земле треугольником, $U_N = 10 \text{ КВ}$, $P = 200 \text{ КВт}$)

Для расчета потребуется тепловая схема замещения, представленная на рис. 1.

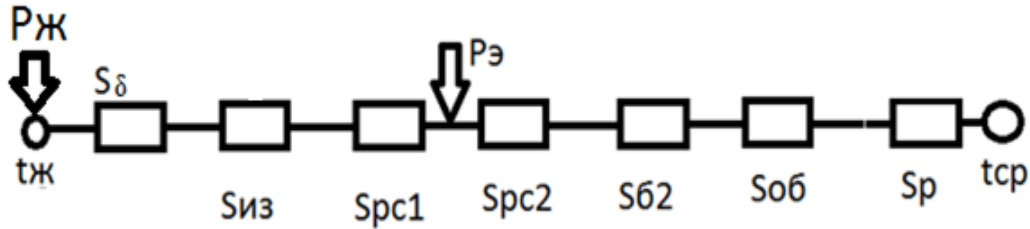


Рис. 1. Тепловая схема замещения кабеля

Определим тепловые сопротивления конструктивных элементов кабеля.

Тепловыми сопротивлениями металлических частей можно пренебречь за малостью таковых.

Для внутреннего термобарьера:

$$S_{бj} = \frac{\sigma_{б}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{бj}}{D_{ж}} \right)$$

$$S_{б} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.295 \\ 0.487 \\ 0.767 \\ 0.949 \end{pmatrix}, \text{ К/Вт}$$

Для изоляции:

$$S_{изj} = \frac{\sigma_{из}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{изj}}{D_{бj}} \right)$$

$$S_{из} = \begin{pmatrix} 0.17 \\ 0.165 \\ 0.162 \\ 0.158 \\ 0.156 \end{pmatrix}, \text{ К/Вт}$$

Для разделительного слоя 1:

$$S_{pc1j} = \frac{\sigma_{pc1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{pc1j}}{D_{изj}} \right)$$

$$S_{pc1} = \begin{pmatrix} 8.271 \times 10^{-3} \\ 8.09 \times 10^{-3} \\ 7.975 \times 10^{-3} \\ 7.807 \times 10^{-3} \\ 7.699 \times 10^{-3} \end{pmatrix}, \text{ К/Вт}$$

Для разделительного слоя 2:

$$S_{pc2j} = \frac{\sigma_{pc1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{pc2j}}{D_{pc1j} + 2 \cdot \Delta z} \right)$$

$$S_{pc2} = \begin{pmatrix} 7.492 \times 10^{-3} \\ 7.344 \times 10^{-3} \\ 7.248 \times 10^{-3} \\ 7.109 \times 10^{-3} \\ 7.02 \times 10^{-3} \end{pmatrix}, \text{ К/Вт.}$$

Для внешнего барьера:

$$S_{\delta 2j} = \frac{\sigma_{\delta 2}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{\delta 2j}}{D_{pc2j}} \right)$$

$$S_{\delta 2} = \begin{pmatrix} 0.683 \\ 0.67 \\ 0.662 \\ 0.651 \\ 0.643 \end{pmatrix}, \text{ К/Вт.}$$

Для окружающей среды:

$$S_{cpj} = \frac{\sigma_3}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot L \cdot 1000}{D_{обj}} \right)$$

$$Scp = \begin{pmatrix} 0.81 \\ 0.807 \\ 0.805 \\ 0.802 \\ 0.801 \end{pmatrix}$$

Определение максимального допустимого тока по тепловой стойкости в зависимости от толщины внутреннего барьера при фиксированной толщине внешнего.

$$Ip_j = \sqrt{\frac{\Delta t}{R_{tr} \cdot [S_{бj} + S_{изj} + (1 + y_{эj}) \cdot (S_{pc1j} + S_{pc2j} + S_{б2j} + S_{обj} + S_{cpj})]}}$$

$Ip_j =$, А.

759.924
707.106
678.158
641.556
620.696

Аналогичные расчеты проведем для внешнего термобарьера при фиксированной толщине внутреннего.

Результаты расчета приведены на рисунке 2.

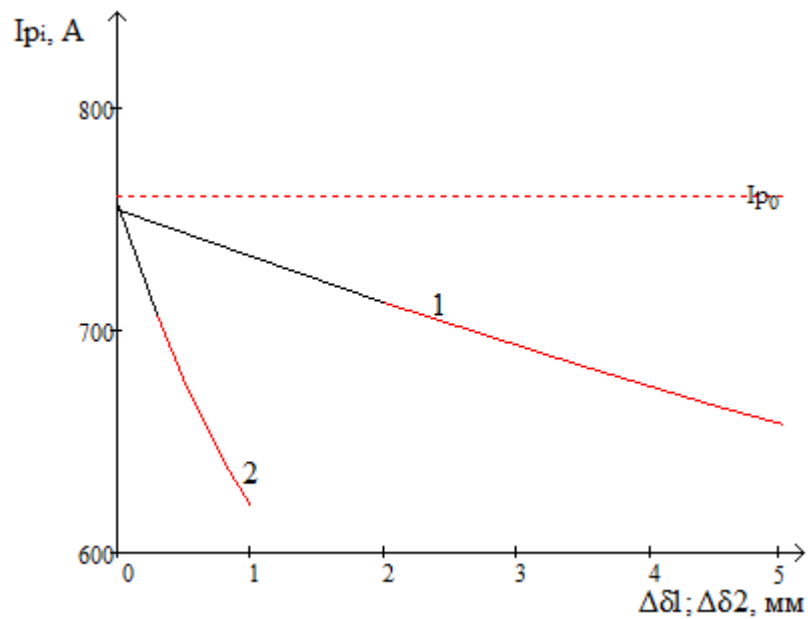


Рис. 2. Зависимость максимального допустимого тока от толщины огненных барьеров: внешнего (1) и внутреннего (2)

Видно, что зависимости имеют неодинаковую жесткость: изменение толщины внутреннего барьера приводит к большему изменению допустимого тока, чем аналогичное изменение внешнего термического барьера. Например, если уменьшить толщину внутреннего барьера из стеклослюдинита на 20%, то максимальный допустимый ток увеличится на 3,4%. При этом увеличение толщины внешнего барьера из пенополиуретана с наполнителем на те же 20% приведет к 2,2% уменьшению максимального допустимого тока. Варьировать толщины барьеров можно вплоть до полной ликвидации внутреннего барьера, что приведет к увеличению максимального допустимого тока, однако по условию проектирования ток нагрузки составляет 641,5 А. Для тока 650 А оптимальным является соотношение $\frac{1}{4}$ между толщинами барьеров, например 0,5 мм внутренний и 2 мм внешний барьер.

Заключение

Предложены конструктивные изменения в огнестойком силовом кабеле: замена материала внешнего огненного барьера на композиционный – вспененный полиуретан с наполнителем пор, содержащим антипирены. Конструкция оптимизирована для заданного напряжения и передаваемой мощности по предельно допустимому фазному току 650 А путем варьирования толщин огненных барьеров: внешнего и внутреннего. Оптимальные толщины барьеров составили 0,5 мм и 2 мм по стеклослюдениту и пенополиуретану соответственно.

Предложенные конструктивные изменения повышают максимальную токовую нагрузку кабеля по сравнению с существующими аналогами, а также повышают надежность кабеля в условиях пламени пожара,

Вспененный полиуретан эффективно запирает тепло, действующее с внешней стороны на кабель, не пропуская его к изоляции. Температура подложки с внутренней стороны огненного барьера не превысит 100°C даже при значительном нагреве с внешней стороны, сравнимом с самым тяжелым пожаром. Температура, при которой сшитый полиэтилен – материал изоляции, может функционировать длительное время равна 90°C. То есть при пожаре изоляция практически не будет подвержена каким-либо изменениям в физико-химических свойствах полиэтилена, в частности термической деструкции, что наиболее важно.

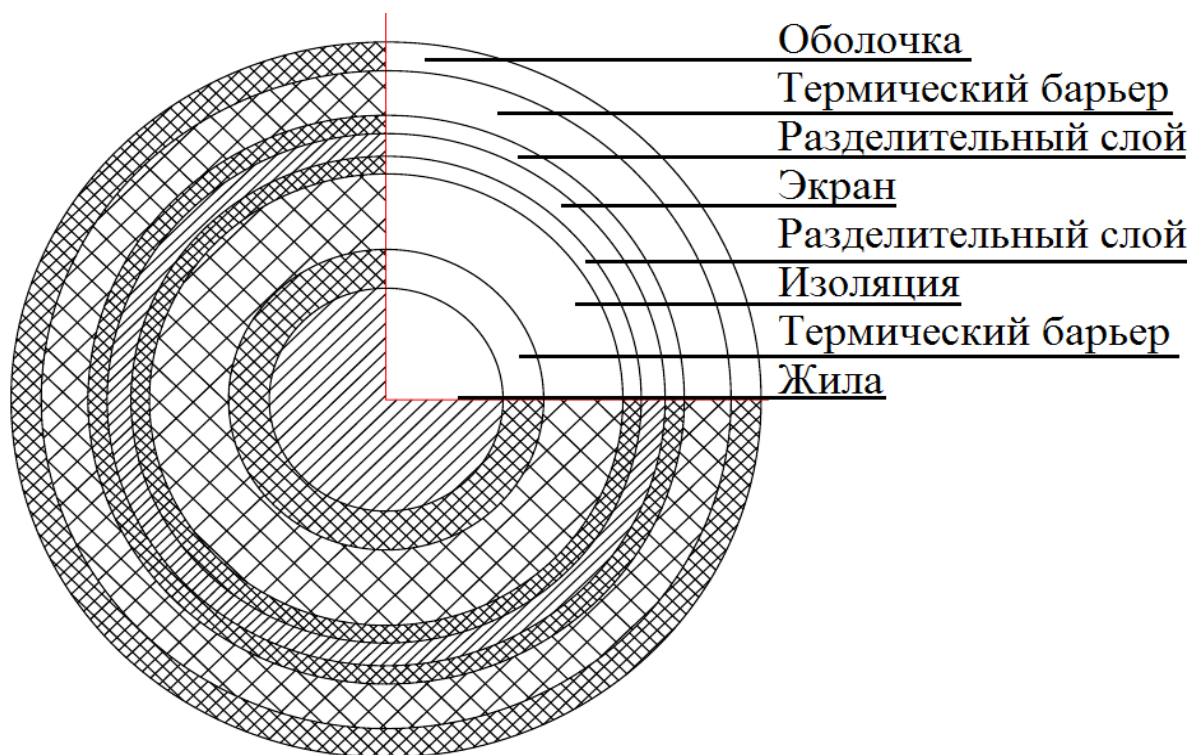
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интернет-журнал «Моя Электрика»: <http://my-electro.net/electrica-v-kvartire/kabel-silovoy-ne-rasprostranyayushhiy-gorenie.html> ©
2. Журнал "Системы безопасности" #6, 2009
3. Журнала "Новости ЭлектроТехники" № 4(82) 2013
4. **Ларина, Э. Т.** Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учебник для вузов / Э. Т. Ларина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоатомиздат, 1996. — 464 с.: ил.
5. **Привезенцев, В. А.** Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии [Text] : учеб. пособие для энергет. и электротехн. вузов / В. А. Привезенцев, Э. Т. Ларина; ред. В. А. Привезенцев. - Москва: Энергия, 1970.
6. Пожарная безопасность в строительстве. декабрь 2009 № 5 // Байков В. А., Каменский М. К. Кабели с повышенными показателями пожарной безопасности для электропроводок в зданиях и на промышленных предприятиях.

Конструкция силового кабеля



Силовой огнестойкий кабель:



**ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003 «Испытания электрических и
оптических кабелей в условиях воздействия пламени»**

