

Термическая стойкость кабельных линий 6–500 кВ. Требования к полиэтиленовым трубам

**Михаил ДМИТРИЕВ, заместитель генерального директора по научной работе
ПКБ «РосЭнергоМонтаж», г. Санкт-Петербург, к.т.н.**

ВВЕДЕНИЕ

Линии с однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) находят широкое применение в сетях всех классов напряжения — от 6 до 500 кВ. Монтаж таких линий осуществляется различными способами, один из которых — прокладка линий в так называемых проколах. После выполнения прокола грунта в него помещаются трубы, в которые затягиваются фазы кабельной линии.

Первые проколы в России выполнялись главным образом под дорогами и площадями, т.е. там, где ведение открытых земляных работ было сопряжено с рядом трудностей. Поскольку протяжённость проколов была небольшой, то в качестве труб для прокладки кабелей можно было использовать, например, асбоцементные трубы, обладающие достаточной механической прочностью и термостойкостью во всех возможных температурных режимах.

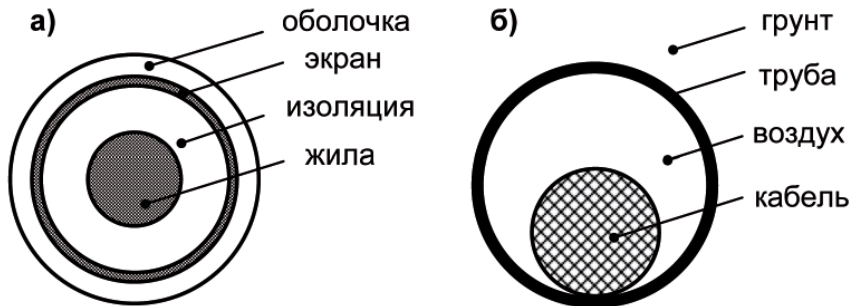
По мере роста объёмов строительства кабельных линий стала появляться потребность в протяжённых проколах, где по понятным причинам применение асбоцементных труб уже было невозможно — ведь эти трубы не гнутся, имеют большой вес и трение о грунт. Тогда для прокладки кабельных линий было опробовано применение метода горизонтально направленного бурения (ГНБ) с использованием полиэтиленовых труб холодного водоснабжения, выполненных из полиэтилена низкого давления (ПНД). Такие трубы недорого стоят, гладкие и лёгкие, обладают необходимой гибкостью, легко и быстро свариваются друг с другом для образования протяжённых однородных участков.

Постепенное удешевление технологии ГНБ, а также широкое использование недорогих ПНД-труб привели к тому, что такому способу монтажа кабелей отдают предпочтение даже тогда, когда кабель можно было бы без особых помех для ежедневной жизни городов проложить обычным способом при помощи открытых земляных работ. В результате этой тенденции доля линий, имеющих протяжённые проколы, постоянно растёт, и уже, например, известны кабельные линии, трасса которых почти полностью проходит в ПНД-трубах.

К сожалению, как выяснилось, ПНД-трубы предназначены для работы в диапазоне температур до 40°C, что меньше температуры 90°C, характерной для нормального режима кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена, и существенно меньше тех температур, которые возникают при коротких замыканиях в кабеле или во внешней сети. Из-за недостаточной термостойкости ПНД-труб существует риск их критической деформации и/или сплавления с оболочкой кабеля, что исключает возможность извлечения кабеля из ПНД-трубы с целью его ремонта или замены.

Отмеченные недостатки ПНД-труб, по сути, вызывают недоиспользование возможностей дорогостоящих кабельных линий 6–500 кВ и высокотехнологичного современного ГНБ-метода. Поэтому в последнее время для организации проколов всё чаще стали использовать термостойкие трубы ProTectorFlex из специальной полимерной композиции, имеющие ряд важных преимуществ над ПНД-трубами, одно из которых — повышенная длительно допустимая температура.

Рис. 1. Конструкция однофазного кабеля 6—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (а) и кабель, проложенный в полиэтиленовой трубе в грунте (б)



Рассмотрим подробнее последствия массового применения ГНБ-технологии и ПНД-труб для кабельных линий 6—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.

ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ, ПРОЛОЖЕННОЙ В ТРУБАХ

На рис. 1а показана принципиальная конструкция однофазного кабеля 6—500 кВ, имеющего жилу, изоляцию, медный экран, требующий заземления, а также оболочку (для защиты кабеля от попадания воды). На рис. 1б схематично изображена фаза кабельной линии, проложенная в заполненной воздухом полиэтиленовой трубе, размещённой в грунте.

При увеличении длин участков кабельной линии, прокладываемых в трубах, будет постепенно ухудшаться её охлаждение, а значит, снижаться пропускная способность кабеля, которая определяется исходя из недопустимости длительного перегрева изоляции из сшитого полиэтилена сверх 90°C [1].

Так, на рис. 2а показано, что охлаждение кабеля в короткой трубе происходит не только за счёт отвода тепла в грунт в радиальном направлении, но и частично в аксиальном направлении — вдоль оси кабеля. За счёт этого пропускная способность кабеля снижается незначительно (на 5—10%) по сравнению со случаем, когда кабель был бы проложен в открытом грунте без применения трубы.

На рис. 2б при увеличении длины трубы становится ясно, что средний участок кабеля теряет возможность охлаждаться в аксиальном направлении, т.е. будет иметь повышенную температуру, из-за чего пропускная способность кабеля снижается заметнее (на 10—20%).

К сожалению, в ряде случаев на стадии проектирования неверный тепловой расчёт линии приводит к завышению ожидаемой пропускной способности кабеля по сравнению с реальной. По этой причине при последующей эксплуатации может происходить перегрев кабеля, особенно на трубных участках [2].

Кроме негативных последствий для изоляции самого кабеля проблемы могут возникнуть и у трубы.

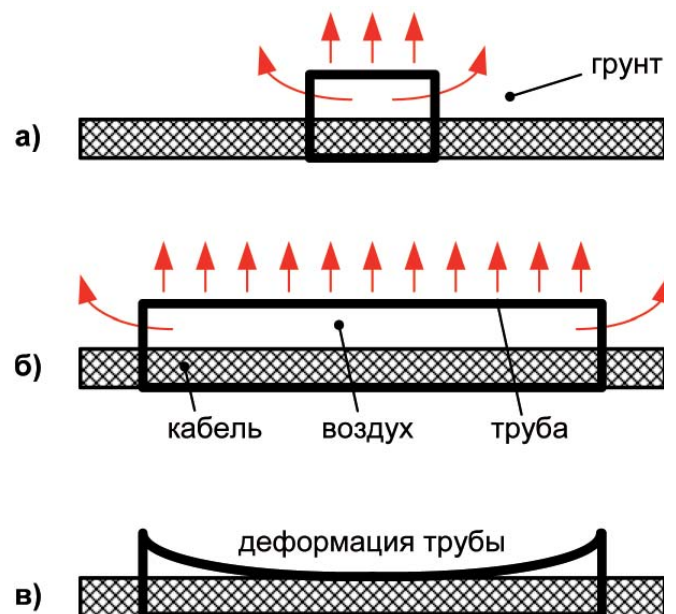
Если полиэтиленовая труба, в которой проложен кабель, не является в достаточной степени термостойкой, то под действием температуры кабеля она может потерять свою механическую прочность и деформироваться, сблизившись с проложенным в ней кабелем (рис. 2в). Также возможна ситуация, когда труба не потеряет кольцевую жёсткость, но несколько размягчится (особенно внутренний слой) и прилипнет к оболочке кабеля.

В любом случае извлечение кабеля из трубы при возникновении такой необходимости окажется невозможным.

Одним из способов снижения температуры изоляции кабельной линии 6—500 кВ и повышения её пропускной способности является борьба с паразитными токами и потерями мощности в экранах кабеля, наводимыми рабочими токами жил. Эти потери существуют при простом двустороннем заземлении экранов (рис. 3а), но в схемах рис. 3б и 3в они отсутствуют [3]. Таким образом, для кабельных линий, имеющих длинные трубные участки, важным является применение:

- термостойких труб;
- схем заземления без потерь мощности в экранах.

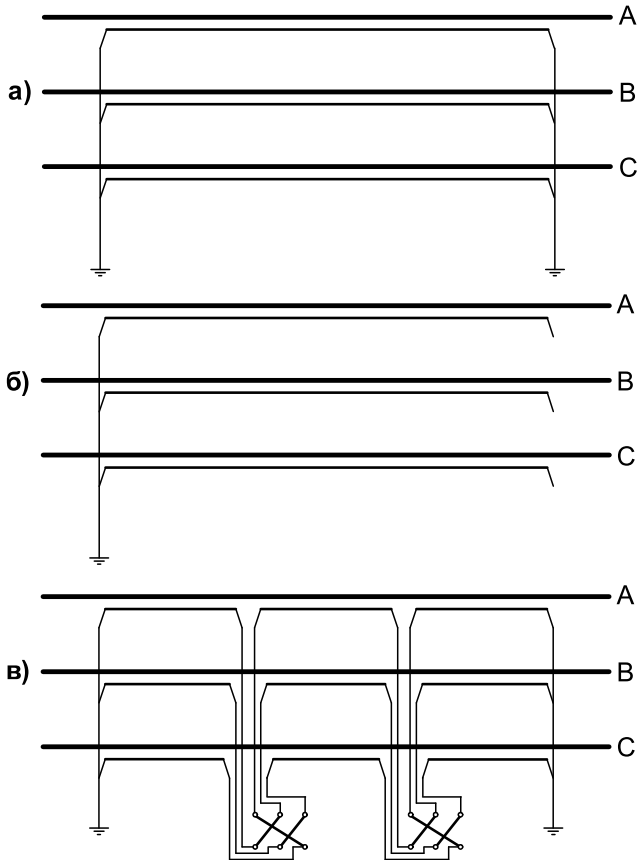
Рис. 2. Отвод тепла от кабельной линии, проложенной в трубе



- а) — короткий трубный участок;
- б) — длинный трубный участок;
- в) — деформация длинной трубы в её средней части.

ПРОКЛАДКА КЛ

Рис. 3. Основные схемы соединения и заземления экранов однофазных кабелей 6—500 кВ



- а) — заземление экранов с двух сторон;
 б) — заземление экранов с одной стороны;
 в) — транспозиция экранов.

ПОИСК ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ, ПРОЛОЖЕННОЙ В ТРУБАХ

Повреждения однофазных кабелей можно условно разделить на повреждения основной изоляции и повреждения оболочки.

Если говорить об основной изоляции, то её повреждения практически всегда приходится на концевые или соединительные муфты и связаны с качеством муфт и их монтажом. Поскольку кабельные муфты обустраиваются вне трубных участков, то наличие проколов не изменяет условий поиска повреждений изоляции и её ремонта.

Если говорить об оболочке кабеля, то её повреждения случаются гораздо чаще, чем у главной изоляции, и могут происходить в любом месте линии, в том числе и на трубных участках. Нарушение целостности оболочки, как правило, связано или с небрежным монтажом, или с внешними воздействиями в процессе эксплуатации (земляные работы рядом с линией, просадки грунта и др.). Например, во время монтажа кабель затягивали в трубу и при этом

серьёзно поцарапали его оболочку — один из возможных случаев, когда повреждение оболочки окажется на участке внутри трубы.

Нормативные документы предписывают периодические испытания оболочки однофазных кабелей 6—500 кВ постоянным напряжением 10 кВ в течение 1 (10) минут. При сильном повреждении оболочка не выдержит таких испытаний, место её повреждения придётся искать и ремонтировать.

Существующие приборы позволяют определить место повреждения оболочки кабельной линии, проложенной в открытом грунте. Однако если повреждение будет на трубном участке, то найти его точное местоположение в трубе уже не получится. Дело в том, что полиэтиленовая труба изолирует кабель от окружающего грунта и выход тока с экрана через повреждённую оболочку в грунт возможен только по концам трубы. Приборы зафиксировав наличие процессов по концам трубы, но где именно в трубе повреждена оболочка кабеля, определить не удастся.

Поскольку нет гарантий, что в трубе отсутствует влага, способная проникнуть в кабель через повреждённую оболочку, то место повреждения надо оперативно обнаружить и оболочку восстановить. Увы, единственная возможность выполнить такое — это обрезать кабель по концам трубного участка, извлечь его из трубы, найти место повреждения, исправить, а затем вновь поместить в трубу и поставить по концам трубного участка внеплановые соединительные муфты. Однако даже при желании и готовности выполнить столь сложный ремонт он может не состояться по причине невозможности извлечения кабеля из ПНД-трубы из-за её деформации и/или слипания с оболочкой.

РЕМОНТ ИЛИ ЗАМЕНА КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ, ПРОЛОЖЕННОЙ В ТРУБАХ

Технология ГНБ является удобной на стадии монтажа кабельных линий, но было бы неплохо сполна пользоваться её преимуществами ещё и на протяжении последующей эксплуатации линии. Иными словами, в случае необходимости всегда должна быть возможность извлечения кабеля из трубы.

Для того чтобы беспрепятственно извлечь кабель из трубы, должны быть выполнены три важных условия:

- труба не должна быть деформирована из-за нерасчётных температурных режимов, в которые она могла попасть в процессе эксплуатации линии;
- труба не должна слипаться с кабелем;
- труба не должна быть заилена из-за плохой герметизации своих концов.

Строго говоря, при прокладке наиболее ответственных линий с однофазными кабелями в допол-

нение к трём фазным трубам можно предусмотреть ещё одну трубу (рис. 4б), выполняющую роль резервной, на тот случай, если что-то случится с кабелем в одной из трёх фазных труб и его будет оттуда не извлечь. Однако возможно представить ситуацию, когда за 30—40 лет эксплуатации линии её ремонт потребуется, скажем, дважды и одной резервной трубы будет уже недостаточно.

Очевидно, что имеет смысл максимально использовать возможность каждой из фазных труб, а к резервной прибегать в самых экстренных случаях. Для этого следует признать важность выполнения названных выше условий: труба должна быть термостойкой (механически прочной, нелипкой), концы трубы должны быть закрыты.

Если говорить о герметизации концов трубы как способе препятствовать попаданию внутрь трубы грунта и грунтовых вод, то эту задачу решить несложно. Наиболее трудными задачами являются обеспечение гарантий отсутствия кольцевой деформации трубы и её слипания с проложенным кабелем.

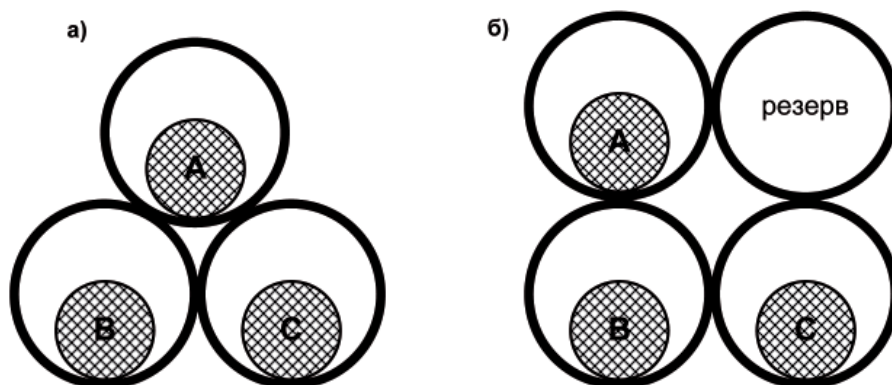
НЕДОСТАТКИ ТРУБ ХОЛОДНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ТИПА ПНД

В настоящее время при прокладке кабельных линий методом ГНБ используются трубы из полиэтилена низкого давления (ПНД). Эти трубы, по сути, являются трубами холодного водоснабжения и по ГОСТ 18599-2001 предназначены для длительной работы в температурном диапазоне до 40°C, а температура их плавления составляет всего 132—135°C [4]. Вместе с тем известно, что температура кабельной линии с однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена в нормальном режиме может достигать 90°C. Кроме того, в ряде случаев температура линии может превосходить 90°C, например, это возможно при перегрузках. Или же это возможно в случаях, когда реальная пропускная способность кабеля оказалась меньше тех значений, которые требуются потребителю, по одной из причин:

- неверно выполнен тепловой расчёт (в него заложено заниженное значение теплового сопротивления грунта, не учтено тепловое сопротивление трубы и воздуха, который её заполняет; другие возможные ошибки);
- неверно выбрана схема заземления экранов кабельной линии (применена схема рис. 3а вместо оптимальных схем рис. 3б и 3в).

Ещё одним случаем разогрева кабельной линии сверх 90°C являются короткие замыкания как во

Рис. 4. Кабельная линия 6—500 кВ с однофазными кабелями, проложенными в трубах без резервной трубы (а) и с ней (б)



внешней по отношению к кабелю сети, так и в самом кабеле.

Если говорить о внешних коротких замыканиях, то их подпитка по жилам кабеля является дополнительным источником нагрева как самого кабеля, так и трубы, в которой он проложен. Например, если в смешанной сети, содержащей и кабельные линии, и воздушные линии (ВЛ), короткое замыкание было на ВЛ и за небольшой интервал времени на ВЛ многократно запускался цикл автоматического повторного включения (АПВ), очевидно, что при некоторых схемах сети кабель будет обтекаться сквозными токами короткого замыкания и окажется нагрет сверх 90°C, а процесс его остывания до исходных 90°C займёт от десятков минут до нескольких часов (постоянная времени нагрева/охлаждения кабеля именно такова и связана с инерционностью тепловых процессов в грунте).

Если говорить о внутренних коротких замыканиях, то здесь ток короткого замыкания сети проходит по жиле кабеля через место повреждения изоляции в экран и далее в его заземляющие устройства. При этом температура жилы может достигать 250°C, а экрана — до 350°C [1]. После быстрого (за время короткого замыкания) нагрева жилы и экрана ток короткого замыкания до указанных температур жилы и экран отдаёт своё тепло изоляции кабеля и его оболочке, а их конечная температура будет зависеть от теплоёмкости изоляции и оболочки.

Согласно расчётам, если температура жилы и экрана выходит на предельные значения 250 и 350°C соответственно, то такого тепловыделения в кабеле хватит на то, чтобы равномерно прогреть его изоляцию и оболочку до 140—160°C. Конкретные значения конечной температуры зависят от многих факторов, в том числе от сечения жилы и экрана кабеля, от класса номинального напряжения кабеля (от объёма изоляции). Прогрев изоляции и оболочки происходит не позднее нескольких десятков минут с

ПРОКЛАДКА КЛ

момента короткого замыкания и отключения кабеля от сети релейной защитой, а вот охлаждение кабеля до температуры окружающего грунта (около 15°C) будет происходить медленно — вплоть до нескольких суток (из-за инерции грунта).

Поскольку температура плавления ПНД-трубы составляет всего 132—135°C (а температура размягчения ещё меньше), то следует ожидать деформации трубы и/или её прилипания к оболочке кабеля и в нормальном режиме работы линии, и при перегрузках, и при внешних по отношению к кабелю коротких замыканиях, и особенно при внутренних повреждениях самой линии.

Деформация ПНД-трубы и/или её слипание с оболочкой сделают невозможным извлечение кабельной линии из трубы с целью её ремонта или замены — потребуется или использование единственной резервной трубы (если она была предусмотрена), или длительная и дорогостоящая организация нового прокола под аварийную фазу, а также закупка однофазного кабеля необходимой длины. К слову сказать, заказ кабеля, его изготовление и доставка к месту монтажа могут занять до нескольких месяцев.

Результаты некоторых предварительных лабораторных исследований ПНД-труб в условиях воздействия на них температур, характерных для кабельных линий с однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, представлены на рис. 5, 6, 7. Зафиксированные здесь деформация трубы и её прилипание к оболочке кабеля делают невозможным извлечение кабеля из трубы в случае возникновения такой необходимости, что увеличивает расходы эксплуатирующей организации на ремонт кабельной линии, или, иными словами, приводит к недоиспользованию всех возможностей как технологии ГНБ, так и самих кабельных линий.

Оболочка кабеля изготавливается из полиэтилена низкого давления. Однако в отличие от ПНД-труб оболочка делается не из обычного ПНД, а из специальных кабельных марок полиэтиленов с присадками и антипиренами. Поэтому оболочка кабеля имеет более высокую температуру размягчения и плавления, т.е. в слипании кабеля с трубой виновата именно ПНД-труба, а не оболочка кабеля.

Если в силу каких-то исключительных обстоятельств короткое за-

мыкание в кабельной линии всё же пришлось на прокол, то тогда температура кабеля и трубы в месте короткого замыкания может достигать очень высоких значений в тысячи градусов, которые не сможет выдержать не только любая полиэтиленовая, но даже и металлическая труба. В этом случае обеспечить целостность трубы и отсутствие её слипания с кабелем будет уже невозможно. Однако тут, повторимся, следует отметить, что согласно опыту эксплуатации по понятным причинам подавляющее большинство повреждённых изоляций кабелей 6—500 кВ приходится на соединительные или концевые муфты или же на участки с прокладкой кабелей в открытом грунте, не имеющие защиты лотками или трубами. Заметим также, что защита кабеля, проложенного в трубе, происходит не из-за самой трубы, а из-за того, что при ГНБ-прокладке труба оказывается заложённой на большой глубине (до 3 м и даже более), что исключает её повреждение сторонними организациями при выполнении земляных работ.

Учитывая изложенное, короткое замыкание в кабеле на трубном участке следует считать практически маловероятным и не принимать его в качестве расчётного случая. Основное внимание надо сосредоточить на работе трубы в нормальном режиме с учётом возможных перегрузок и при прохождении по жилам и экранам токов короткого замыкания, место которого лежит за пределами трубного участка.

Как показали исследования, ПНД-трубы, выполненные по ГОСТ 18599-2001, не годятся для прокладки кабелей 6—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, поскольку рассчитаны на работу при температурах до 40°C.

Рис. 5. Перегрев ПНД-трубы и её деформация



ТРЕБОВАНИЯ К ТРУБАМ ДЛЯ ПРОКЛАДКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Перечисленные особенности протяжённых трубных участков трассы кабеля, а также свойства ПНД-труб заставляют серьёзно задуматься о требованиях к трубным участкам и применяемым на них трубам.

Главным специфическим требованием к трубам, которые можно использовать для прокладки кабельных линий, является их термостойкость в различных режимах работы КЛ, которая заключается в том, что трубы не должны терять кольцевой жёсткости и прилипать к кабелям.

Для кабельных линий 6—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена трубы должны быть термостойкими, во-первых, при характерных для длительного нормального режима температурах до 90°C. Во-вторых, при температурах до 150°C (и более), связанных с перегревом кабеля токами короткого замыкания или с возможными ошибками в проектировании кабельных линий (неверный тепловой расчёт, неверная схема заземления экранов, неверный учёт перегрузок).

Кроме того, трубы должны обладать характеристиками, которые позволили бы беспрепятственно монтировать их с применением технологии ГНБ:

- труба должна быть в достаточной степени гибкой;
- труба должна подвергаться контактной сварке для организации сплошных проколов большой длины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПНД-труба является трубой холодного водоснабжения и предназначена для длительной работы в диапазоне температур до 40°C, что существенно меньше тех значений температур, которые характерны в различных режимах работы линий 6—500 кВ с однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Поэтому целесообразно приостановить применение ПНД-труб для прокладки силовых кабелей 6—500 кВ и использовать термостойкие трубы.

Прокладку кабельных линий классов номинального напряжения от 6 до 500 кВ рекомендуется производить не в ПНД-трубах, а в трубах типа ProTectorFlex из полимерной композиции высокой термостойкости.

Рис. 6. Деформация ПНД-трубы и защемление проложенного в ней однофазного кабеля



Рис. 7. Прилипание ПНД-трубы к поверхности оболочки однофазного кабеля



ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.060.20.071-2011 «Силовые кабельные линии напряжением 110—500 кВ. Условия создания. Нормы и требования» (Москва, ОАО «ФСК ЕЭС», 2011).
2. Титков В.В., Дудкин С.М. Влияние способов прокладки на температурный режим кабельных линий 6—10 кВ и выше // «Новости Электротехники», № 3 (75), 2012 г.
3. СТО 56947007-29.060.20.103-2011 «Силовые кабели. Методика расчёта устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена» (Москва, ОАО «ФСК ЕЭС», 2011).
4. ГОСТ 18599-2001 «Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия».