



ЩЕРБА А.А., чл.-корр. НАНУ, докт. техн. наук, проф., зав. отделом,
КУЧЕРЯВАЯ И.Н., докт. техн. наук, вед. научн. сотрудник.

Ин-т электродинамики НАН Украины, г. Киев

ЗОЛОТАРЕВ В.А., докт. техн. наук, проф., генеральный директор,
БЕЛЯНИН Р.В., нач. производства,

ПАО «Завод «Южкбель», г. Харьков

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СШИТО-ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ РАЗНЫХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Представлен аналитический обзор литературных источников относительно производственных процессов изготовления современной сшитой-полиэтиленовой изоляции силовых кабелей классов низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. Проведено сравнение основных технологических процессов сшивки полиэтиленовой изоляции — силанольной и пероксидной технологий. Описаны особенности полиэтиленовой изоляции кабелей на микро- и макроуровнях, связанные с ее изготовлением и длительной эксплуатацией, а также факторы, влияющие на степень деградации и снижение электрической прочности изоляции. Приведенная информация может быть полезна производителям кабельно-проводниковой продукции и организациям, эксплуатирующим силовые кабели с сшитой-полиэтиленовой изоляцией.

Ключевые слова: сшитая-полиэтиленовая изоляция силовых кабелей, силанольная и пероксидная технологии сшивки, факторы влияния на деградацию и электрическую прочность изоляции, кабели низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения.

Потребность в применении силовых электрических кабелей с надежной изоляцией возникла одновременно с созданием первых электростанций для передачи электрической энергии на большие расстояния. Изготовление современных кабелей со сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией — надежной, гибкой и без экологически вредных жидких компонентов упрощает технологию строительства и ремонта кабельных линий электропередачи (ЛЭП) с различными уровнями и резкими изгибами на трассе прокладки, особенно при выводе больших мощностей от крупных атомных, тепловых и гидроэлектростанций к промышленным и городским потребителям электроэнергии [1, 2].

Отметим, что первая в мире ЛЭП с использованием силовых кабелей с СПЭ изоляцией на напряжение 500 кВ была запущена в 1998 г. для отвода мощности от токийской гидроэлектростанции Kazunogawa [3].

К настоящему времени в странах Европы, Америки, Азии и даже Африки работает большое количество ЛЭП с кабелями с СПЭ изоляцией на разные уровни напряжения, получен положительный опыт их эксплуатации. Кабели с СПЭ изоляцией использованы, например, при прокладке двух кабельных линий напряжением 525 кВ для гидроэлектростанции Дачаошан (Китай, провинция Юнань) [4]. Здесь почти 2,5 км СПЭ-кабеля соединили 6 генераторов ГЭС с элегазовой подстанцией, частично кабели проложены вертикально в шахте глубиной 145 м, что возможно только для кабелей такого типа изоляции. В России кабель с СПЭ изоляцией на сверхвысокое напряжение 500 кВ применен при строительстве Бурейской ГЭС для при-

соединения блока к элегазовой подстанции 500 кВ. Для Бурейской ГЭС кабель сечением 800 мм² проложен одной строительной длиной (около 900 м), включая вертикальную шахту 115 м. Известен также гидроэлектрический проект в Эквадоре с применением 7 км одножильного кабеля с изоляцией из СПЭ на напряжение 500 кВ, сечением 1600 мм² [5]. Кабель предполагается использовать для передачи электроэнергии, вырабатываемой самой крупной в Эквадоре гидроэлектростанцией, сооружаемой на реке Кока (Coca), к подстанции для последующего распределения энергии в энергосистему этой страны. Эксплуатация гидроэлектростанции может покрыть более трети потребности Эквадора в электроэнергии (75 % его территории) [5].

Для достижения высокой надежности и длительного срока эксплуатации силовые кабели с СПЭ изоляцией изготавливаются с применением современных технологий производства и испытания их на надежность по всей строительной длине. При этом большое внимание уделяется рентабельности производства кабельной продукции.

Применение СПЭ изоляции позволяет расширить температурный диапазон длительной (непрерывной) эксплуатации кабелей от 70 до 90 °С. При этом в режимах перегрузки (до 8 часов в сутки) — до 130 °С, а в случае токов короткого замыкания — до 250 °С [2, 6]. К достоинствам таких кабелей относятся повышенные нагрузочная способность, термическая и механическая устойчивость, химическая стойкость в агрессивных средах и малая дефектность изоляционного материала на микроуровне [6–8].

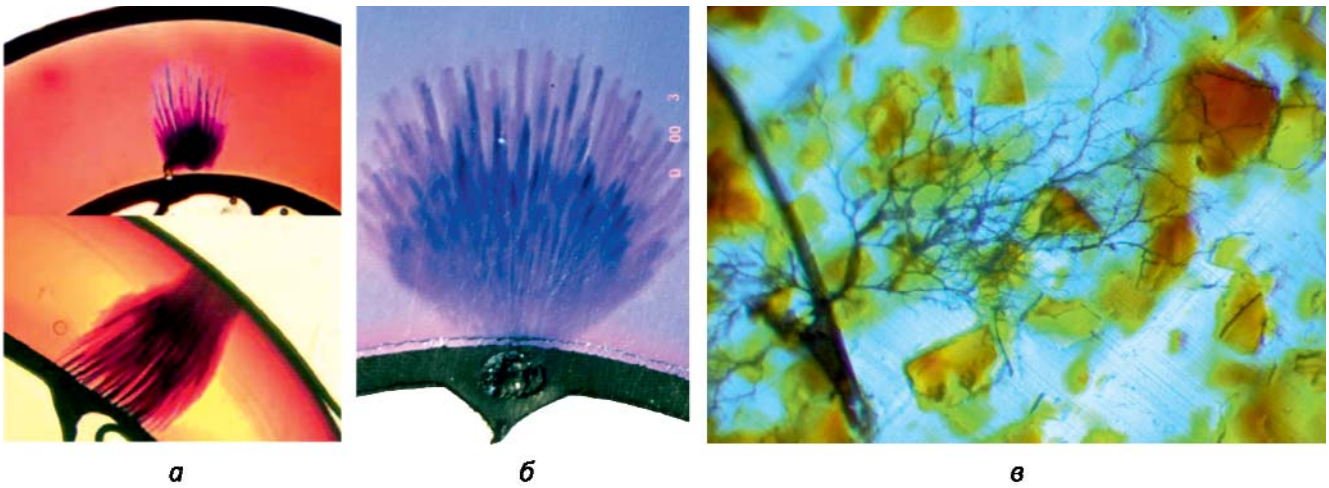


Рис. 1. Водные триинги, распространившиеся по толщине изоляции кабеля [16, 17] (а); триинг веерного типа, возникший в месте дефекта полупроводящего слоя изоляции [18] (б); развитие электрических триингов в полиэтиленовой изоляции с посторонними включениями [19] (в).

Термин «сшивка» полиэтиленовой изоляции подразумевает создание трехмерной структуры с образованием поперечных химических связей между линейными макромолекулами полиэтилена при его термической обработке, что позволяет значительно улучшить его эксплуатационные свойства электрической изоляции силовых кабелей (Табл. 1) [9].

СПЭ изоляция обладает высокими электрическими, механическими характеристиками в широком диапазоне рабочей температуры [10, 11], однако может быть подвержена деградации и триингообразованию, поскольку достаточно чувствительна к различным микродефектам и посторонним включениям [2]. Такое обстоя-

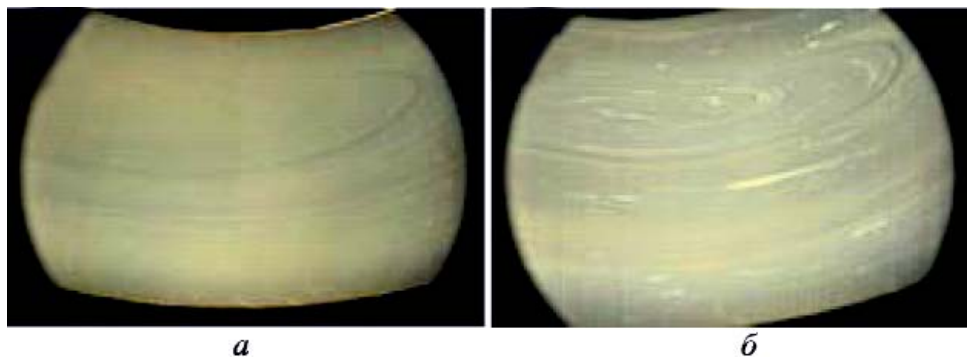


Рис. 2. Влияние скорости экструдирования на однородность структуры полиэтиленовой изоляции, изготовленной при оптимальной (а) и повышенной (б) скорости экструзии [12].

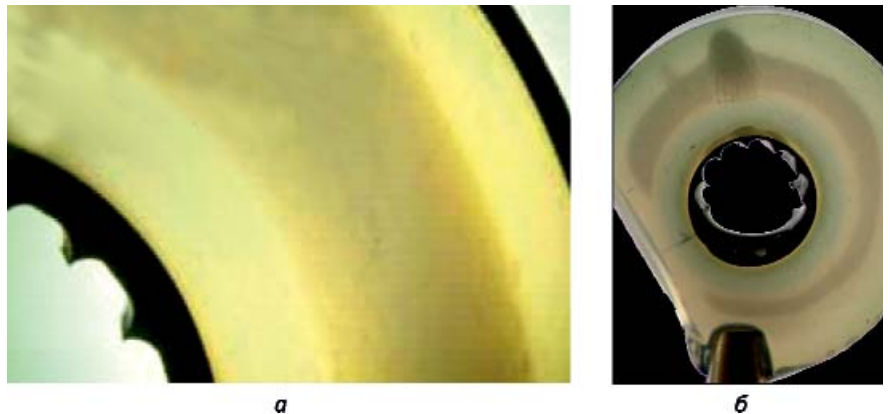


Рис. 3. «Гало» из газовых микрополостей в изоляции, обусловленное недостаточной степенью дегазации [21]; триинг в области «гало» в полиэтиленовой изоляции

Таблица 1. Изменение свойств полиэтилена после вулканизации [9].

Свойства полиэтилена	Изменение после сшивки
Показатель текучести	уменьшается
Плотность	не изменяется / уменьшается
Молекулярный вес	значительно увеличивается
Прочность при растяжении	не изменяется / немного увеличивается
Удлинение на разрыв	уменьшается
Прочность на удар	значительно улучшается
Устойчивость к истиранию	намного улучшается
Устойчивость к трещинообразованию	намного улучшается
Свойства упругости	намного улучшается
Устойчивость к растрескиванию в условиях внешней среды	увеличивается
Замедление роста трещин	увеличивается
Термостойкость	намного улучшается
Химическая стойкость	значительно увеличивается



Рис. 4. Гранулы полиэтилена, используемые при изготовлении сшитого-полиэтиленовой изоляции [18].



тельство вызывает необходимость повышения качества изготавливаемой СПЭ изоляции и учета факторов, влияющих на неоднородность распределения электрического поля в изоляции и соответственно интенсивность электрофизических механизмов, приводящих к ее старению.

В монографии [2] показано, что поверхностные микроразмерные дефекты в изоляции вызывают большее локальное усиление электрического поля, чем внутренние дефекты таких же свойств и размеров. Предполагается, что поверхностные дефекты являются причиной более интенсивной деградации СПЭ изоляции кабелей, чем внутренние. Важно, чтобы на поверхности СПЭ изоляции кабелей на сверхвысокие напряжения отсутствовали микродефекты в виде, например, микровыступов, направленных внутрь изоляции, газовых или водных полостей других инородных включений. В решении этого вопроса ключевую роль играет применение современной технологии изготовления первичной медной и алюминиевой катанки с целью достижения высококачественной ее поверхности.

Особое значение имеют условия технологического процесса производства медной и алюминиевой катанки для многопроволочных жил большого сечения, при изготовлении которых используется электромеханическое оборудование для вытягивания, скручивания, уплотнения и продольной герметизации и должна обеспечиваться возможность предотвращения попадания влаги из внешней среды в слой изоляции через контакт с жилой. Необходимость разработки и применения специальных методов уменьшения макро- и микронеровностей и сокращения дефектов на поверхности катанки обусловлена тем, что на последующих этапах изготовления многопроволочных жил большого сечения названные недостатки исправить невозможно. Создание таких методов существенно усложняется при изготовлении жил, состоящих из многопроволочных изолированных сегментов, — жил конструкции типа «Милликен» [2].

Таким образом, качество поверхности первичной медной проволоки, используемой для изготовления жил, совместно с высоким напряжением силовых кабелей в наибольшей степени определяют требования к параметрам полупроводящего полимерного слоя между жилой и изоляцией, а также к свойствам основной изоляции кабелей. Следует также учитывать, что наличие сильного электрического поля и проникновение влаги в объем СПЭ изоляции способствуют возникновению и развитию в ней со временем триинговых структур, образованию электрических трингов [2, 11–15], а также могут приводить к пробое всего слоя изоля-

ции, как показано на Рис. 1 [16–19].

Перечисленные выше основные преимущества кабелей с СПЭ изоляцией связаны непосредственно со свойствами полиэтилена и зависят от особенностей технологий сшивки — химических, температурных и временных отличий способов вулканизации материала. Все это влияет не только на свойства полиэтиленовой изоляции, но и, как следствие, на эксплуатационные характеристики силовых кабелей.

Качество полиэтиленовой изоляции кабелей во многом зависит от способа и технологических режимов ее формирования (условий экструзии, сшивки, охлаждения, степени дегазации) [12, 20]. Например, на Рис. 2 показаны различия в морфологии образцов изоляции кабелей, произведенных при оптимальной и повышенной скорости экструзии [12]. В этой же работе установлено также влияние условий технологического процесса изготовления на электрическую прочность изоляции. По результатам работы [21] на Рис. 3 показана неоднородность изоляции, обусловленная недостаточной степенью дегазации. Наряду с внутренними механическими напряжениями остаточное газосодержание в полиэтиленовой изоляции также влияет на ее электрическую прочность в силу возможного образования триинговых структур (Рис. 3, б).

Рассмотрим основные технологии сшивки полиэтиленовой изоляции и их рациональные применения для силовых кабелей и изолированных проводов различных классов напряжения. На современном этапе наиболее распространены три технологии получения сшитой-полиэтиленовой изоляции кабелей, различающиеся способами образования поперечных химических связей между макромолекулами полимера [7, 9, 22, 23]:

1. Радиационный способ, использующий облучение электронами (отдельные молекулы полиэтилена сшиваются между собой под действием ионизирующего излучения так, что получается пространственная химическая связь). Этот способ применяется для кабелей и проводов с малой толщиной изоляции (проводов и кабелей специального назначения — авиационных, бортовых и др.).

2. Пероксидный способ осуществляется при высоких температуре и давлении материала в сухой, нейтральной к изоляции, среде в присутствии пероксидов — различных органических перекисей.

3. Силанольный (силановый) способ предусматривает обработку полиэтилена в горячей среде воды или пара, в которую вводятся органосиланы и катализатор.



Для кабелей на напряжение до 6 кВ получила распространение сшивка при помощи силанов, а для кабелей на среднее, высокое и сверхвысокое напряжение (от 6 до 500 кВ) — пероксидная сшивка [7, 22]. Основные типы сшиваемых композиций полиэтилена, используемых в странах СНГ, в том числе в Украине, при производстве кабелей и проводов энергетического назначения, приведены в Табл. 2 [24].

Для изготовления изоляции современных силовых кабелей и проводов применяются композиции производства фирм Borealis и Dow Wire and Cable в силу того, что аналогичные композиции в странах СНГ пока не производятся. Основой СПЭ изоляции является полиэтилен, способный образовывать устойчивые поперечные химические соединения между своими молекулами при том или ином способе сшивки (Рис. 4).

Отметим, что в Табл. 2 дан ряд материалов, качество и надежность которых проверены временем. Для использования новых композиций требуется проведение долгосрочных испытаний на стойкость к длительному воздействию эксплуатационных факторов.

В работе [24] приведены объемы потребления композиций пероксидной и силанольной сшивки для производства кабелей всех классов напряжения.

Фирма Borealis, изготавливающая материалы для производства силовых кабелей, называет полиэтилен, сшитый пероксидным способом, классической системой сшитого полиэтилена [25]. На рынке материалов предлагаются композиции сшитого полиэтилена для кабелей среднего напряжения и сверхчистые композиции полиэтилена для производства силовых кабелей высокого и сверхвысокого напряжения.

В работе [21] представлены технологии изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, применяемые кабельными заводами Ассоциации «Электрокабель», в которую входит и украинский завод «Южкбель». Среди крупнейших заводов-производителей кабелей с СПЭ изоляцией наиболее распространенной технологией является пероксидная сшивка и используется она для получения кабельных изделий на среднее, высокое и сверхвысокое напряжения. Силанольный способ сшивки имеет меньшее распространение и применяется для кабелей низкого напряжения. От-

метим, что ПАО «Завод Южкбель» первым в странах СНГ освоил производство силовых кабелей по технологии пероксидной сшивки на рабочие напряжения 6–330 кВ с использованием наклонных линий газовой вулканизации европейских фирм Troester (Германия), Maillefer (Финляндия). Вместе с тем на заводе применяется силанольная сшивка для силовых кабелей низкого напряжения (до 6 кВ) и при производстве самонесущих изолированных и защищенных проводов [26, 27].

Как отмечено выше, качество произведенных кабелей определяется, прежде всего, дефектностью системы изоляции, что зависит от многих связанных факторов, среди которых степень сшивки, стабильность размеров, морфология, электрическая прочность, уровень остаточных механических напряжений, степень дегазации изоляции. Например, доля (или степень) сшивки в общем случае оказывает влияние на кристалличность, внутреннюю структуру, механические, тепловые и изоляционные свойства материала.

По определению степень или плотность сшивки — это доля общего числа звеньев полимера, которые вовлечены в образование сетчатой трехмерной структуры. Так, понятие «степень сшивки» (доля геля) отражает количественную часть связей между молекулами полиэтилена. Степень сшивки определяет плотность материала, выражается в процентах, в среднем составляет 65–75%. Отметим, что максимальная доля сшивки для пероксидного способа определяется количеством пероксида или временем нахождения изделия в вулканизационной трубе, а для силанольной технологии — количеством органосиланов и временем выдержки во влажной среде. Для экс-

Таблица 2. Полиолефиновые сшиваемые композиции для изоляции кабелей и проводов [24].

Тип композиции	Базовые марки ПЭ	Производители (поставщики)
1. Полиэтиленовые композиции пероксидной сшивки для изоляции силовых кабелей на напряжение 10–35 кВ	LE 4205R, LH4201R	Borealis
	HFDK 4202 EC	DOW Wire and Cable
2. Полиэтиленовые композиции для изоляции силовых кабелей на напряжение 110–220 кВ	LE 42015, LE 42445	Borealis
	HFDK 4201 SC, HFDK 4202 SC	DOW Wire and Cable
3. Силанольносшиваемые композиции для изоляции: – силовых кабелей до 6 кВ – самонесущих проводов	LE 4421M/LE 4431 LE 4421/LE 4472	Borealis
4. Электропроводящие композиции полиэтилена для экранов силовых кабелей с СПЭ силовых кабелей с силанольной изоляцией	HFDK 0586 BK, HFDK 0587 BK, HFDA 0801 BK EC	DOW Wire and Cable
	LE 0500, LE 05925, LE 8220, LE 0595	Borealis
	LE 0540, LE 0574	Borealis

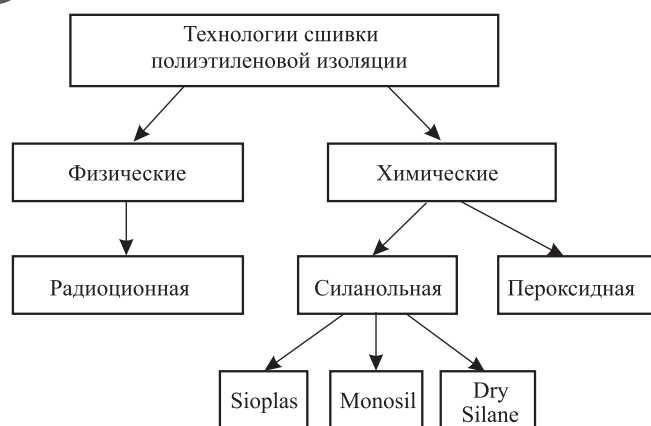


Рис. 5. Рассматриваемые технологии получения сшитого полиэтилена.

плуатирующих организаций важным показателем качества изоляции является степень содержания влаги в ней, что в значительной мере влияет на срок службы силовых кабелей [28, 29].

К основным критериям оценки качества силовых кабелей относится электрическая прочность, которая определяет их надежность.

Основные технологии производства СПЭ изоляции представлены на Рис. 5.

Далее сравним способы производства кабелей с СПЭ изоляцией на низкое (до 6 кВ), среднее (6–35 кВ), высокое (36–161 кВ) и сверхвысокое (более 161 кВ) напряжения.

Общая характеристика основных технологий сшивки изоляции и их сравнение.

Пероксидный способ сшивания полиэтилена предусматривает использование газовой (сухой) вулканизации. Способ реализуется при введении в полимер вулканизирующего агента пероксида (например, перекиси дикумила). Вулканизация при высокой температуре (до 450 °С) — температуре, близкой к температуре разложения перекиси, и давлении до 14–20 атм. происходит в инертной газовой среде (в среде азота) одновременно с экструзией трехкомпонентной изоляционной системы, состоящей из полупроводящего экрана по жиле, основной изоляции и полупроводящего экрана по изоляции. В инертной среде изоляционная система не подвергается окислению и деградации, тем самым обеспечивается ее триинговость и надежность [29]. Кроме того, в ходе технологического процесса побочные продукты деления пероксида (метан, метиловый спирт, и др.) со временем испаряются сами или могут удаляться в специальной термокамере путем дегазации, т.е. не образуют инородных включений в изоляционном материале [30].

Отметим, что при применении пероксидной технологии достигается высокая степень сшивки и равномерность изоляционного материала (более

80%), стабильность геометрии конструкции, улучшенные изоляционные свойства [31–33]. На всех стадиях производства проводится жесткий контроль температурного режима и точности технологического процесса, за счет чего и обеспечивается высокое и стабильное качество сшивки. Вместе с тем такое производство требует значительных капиталовложений, отличается меньшей производительностью, более высоким энергопотреблением на нагрев вулканизационных труб и большими эксплуатационными затратам (высокой стоимостью жидкого азота, оплатой потребляемой электроэнергии). Применяется пероксидная технология для изготовления кабелей на напряжение от 6 до 500 кВ [34–36]. В [33] пероксидный способ сшивания полиэтилена предлагается для изготовления кабельной продукции на напряжение выше 3,3 кВ.

Силанольный способ сшивания полиэтилена основан на введении в полимерные цепочки химических соединений на основе силанов для образования поперечных связей между макромолекулами под воздействием влаги (пара или горячей воды). В отличие от пероксидной технологии вулканизация проходит после процесса экструзии, т.е. технологический процесс разделяется на два этапа. На первом этапе осуществляется наложение изоляции и формирование трехслойной изоляционной системы, на втором этапе — сшивание полиэтилена в водной или паровой среде при температуре до ~70–90 °С, или в условиях окружающей среды (20 °С) в течение более длительного времени.

Продукты деления при силанольной сшивке выполняют соединительную функцию между молекулами полиэтилена для образования пространственной химической сетки и не удаляются из материала, как при пероксидном способе. Они представляют собой инородные включения в химическом составе полимера, имеют отличающиеся от него электрические свойства (электропроводность и диэлектрическую проницаемость), могут быть причиной неравномерного распределения электрического поля в изоляции при эксплуатации кабелей, приводить к ускоренному ее старению и сокращению срока службы кабелей. К тому же, технологический процесс проходит во влажной среде, что создает условия для проникновения воды в изоляцию и предпосылки для образования водных и электрических триингов [12–15, 28, 29].

В настоящее время распространены три основных промышленных процесса силанольной сшивки полиэтилена — Monosil, Sioplas и Dry Silane.



1. *Одноэтапный процесс Monosil.* При использовании этого процесса полиэтилен, силан и другие добавки вводятся в течение одного непрерывного экструзионного этапа. Технологический процесс Monosil характеризуется экономической эффективностью, однако не лишен таких недостатков [9]: основные этапы производства не разделены, а реализуются в едином процессе; необходимы строгий контроль количества химических компонентов и технологических условий; требуется наличие сложной аппаратуры и оборудования.

2. *Двухэтапный процесс Sioplas* характеризуется разделением этапа модификации полиэтилена с помощью органических силанов и прививок и этапа обработки композиции с введением катализаторов и антиоксидантов. Для осуществления сшивки процесс предполагает присутствие водной среды (пара или горячей воды, нагретой до температуры ~ 90 °С). Это создает опасность развития водных трингов и поэтому накладывает ограничения на производимую кабельно-проводниковую продукцию. По такой технологии в мире производятся силанольно-сшиваемые композиции полиэтилена для производства самонесущих и защищенных проводов и силовых кабелей низкого напряжения (до 6 кВ). Использование силанольной сшивки для силовых кабелей среднего напряжения не может гарантировать их длительную эксплуатацию вследствие проникновения влаги в изоляцию и потенциального появления и развития водных трингов.

3. *Способ Dry Silane* предусматривает смешение гранул, содержащих концентрат силана, с обычным полиэтиленом (содержание концентрата силана 3–5%), после чего проводится экструзия и сшивка путем выдержки в горячей воде или паре при температуре ~70–90 °С. Время выдержки зависит от толщины изоляции изделия. Этот способ сшивки внедрен на заводе «Южкабель».

Отметим, что в силу описанных причин при выборе силанольного способа производства кабелей даже на напряжение 6 кВ необходимо предусмотреть строгое выполнение требований международных стандартов (например, [37, 38]), относительно качества материалов, геометрических, электрических и механических свойств экструдированной изоляции.

Как сообщается в работе [39], основное препятствие для распространения кабелей с силанольно-сшитой изоляцией состоит в требовании европейских стандартов

проведения длительных (двухгодичных) испытаний кабелей в условиях повышенного воздействия влаги, температуры и напряжения — основных причин ускоренного старения изоляции. Информация об успешном прохождении длительных испытаний кабелей с силанольно-сшитой изоляцией, к сожалению, не найдена.

В статье [39] представлены результаты сравнения электрической прочности кабелей, изготовленных по двум технологиям сшивки изоляции. Показано, что нормированное значение пробивной напряженности для пероксидного кабеля в исходном состоянии почти на 40% выше, чем у силанольного. Это позволило автору статьи [39] предположить, что силанольная изоляция кабелей менее надежна в процессе длительной эксплуатации и имеет меньший срок службы по сравнению с изоляцией, сшитой пероксидным способом.

На постсоветском пространстве есть приверженцы силанольной сшивки для кабелей на напряжения 6 и 10 кВ. Однако надо признать, что для объективной оценки силанольного способа сшивки изоляции требуются более глубокие научно-исследовательские работы по изучению и совершенствованию силанольно-сшиваемых материалов и ресурсным характеристикам кабелей с изоляцией на их основе, необходим также опыт длительного использования эксплуатирующими энергетическими организациями и проверка качества таких кабелей в испытательных центрах в соответствии с европейскими стандартами HD-620 (нормы испытаний) и HD-605 (методы испытаний). Отметим, что результаты таких испытаний для силанольно-сшиваемой изоляции остаются неизвестными.

В целом выбор технологии производства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена должен основываться на многих факторах, среди которых высокое качество силовых кабелей, надежность, срок службы, эксплуатационные характеристики, разумный уровень капитальных затрат, конкурентоспособность продукции по качеству и стоимости.

Сравнение технологий сшивки. Свойства и качество изоляции зависят от физических свойств полиэтилена, получаемого в результате того или иного способа сшивки.

Таблица 3. Сравнение физических свойств полиэтилена высокой плотности, сшитого различными способами [22].

Параметры	Способы сшивки		
	пероксидный	радиационный	силанольный
Максимальная доля геля, %	73	88	63
Физические свойства при доле геля 60%:			
– модуль упругости, МПа, при 190 °С	0,24	0,2	0,14
– кристалличность (после сшивки)	69	60	69

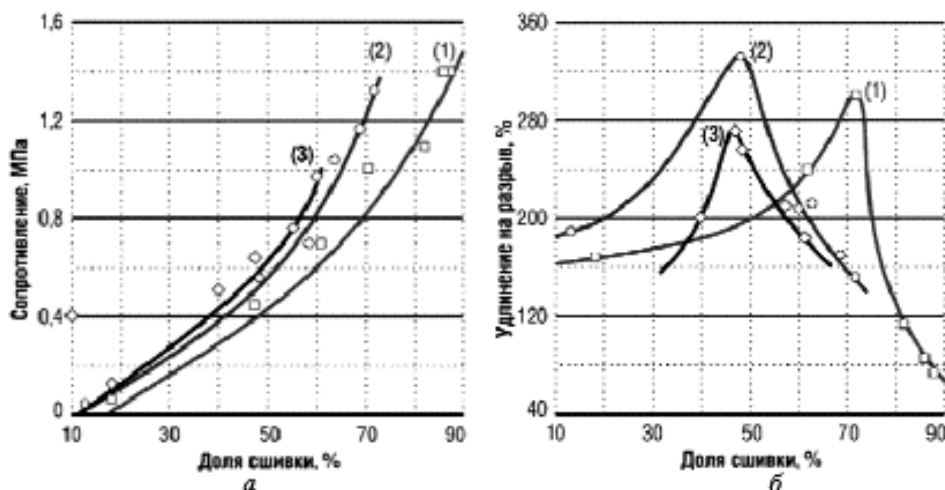


Рис. 6. Зависимость от доли сшивки механического сопротивления (а) и удлинения на разрыв (б) для полиэтилена, полученного 1 – пероксидным; 2 – радиационным; 3 – силанольным способом [40].

В одной из ранних работ [40] показано, что макроскопические свойства влияют на качество сшивки, но основное отличие технологий состоит в достигаемой степени кристалличности. Подтверждают это и данные, полученные в [22] (Табл. 3). Как показано, степень сшивки (доля геля) оказывается выше для материалов, полученных пероксидным способом. В статье [40] путем исследования механических свойств сделан вывод о более однородной структуре сшивки в случае применения пероксидной технологии (Рис. 6).

В Табл. 4 приведены характерные значения степени сшивки для различных технологий.

В статье [42] выполнено исследование деградиационных процессов в сшитом полиэтилене под действием температуры и ультрафиолетового излучения. Показано, что по сравнению с пероксидной сшивкой полиэтилен, сшитый силанольным способом, имеет менее однородную структуру, более чувствителен к деградации, причем способен разрушаться более неоднородно.

В Табл. 5 представлены сравнительные данные для различных технологий сшивки полиэти-

Таблица 4. Характерные значения степени сшивки для различных технологий [41].

Способ сшивки	Степень сшивки, %
Пероксидный	≥ 70
Силанольный	≥ 65
Радиационный	≥ 60

Таблица 5. Сравнение способов сшивки по данным фирмы Mallefer Extrusion [33] и работ [41, 43].

Параметры	Способы сшивки	
	силанольный	пероксидный
Пробивная напряженность, кВ/мм	20–30	50–70
Усадка	высокая	низкая
Степень сшивки	колеблется	стабильная
Содержание воды, ppm	300	100–200
Образование утолщений, наплывов	легко образуются	контролируемы

лена по различным критериям [32, 41, 43]. Отметим, что швейцарская фирма Mallefer Extrusion является ведущим производителем вулканизационных линий [31].

Как показано в Табл. 5, более высокое содержание воды имеет место в полиэтилене силанольной сшивки. Данные согласуются с информацией работы [44], в которой сообщается о высоком уровне влаги в изоляции силанольной сшивки (вплоть до 300 ppm) и большом количестве микронеоднородностей в виде воздушных включений в изоляционной структуре.

Во время тестирования авторами [44] во многих случаях отмечено возникновение триингов в силанольной изоляции кабелей. Согласно докладу [44] на протяжении более 25 лет все кабели со сшитой-полиэтиленовой изоляцией в Юго-Восточной Азии и Океании производятся с помощью сухой вулканизации, обеспечивая тем самым максимальное поглощение воды менее 200 ppm. При экспериментальном исследовании таких кабелей в [44] показано практически отсутствие водных триингов.

В работах [45–47] описана технология термомпластикации полиэтилена, сшитого как пероксидным, так и силанольным способами. По результатам изучения в [47] пероксидно-сшитый материал признан более технологичным при переработке, в силу более низкого содержания остаточного геля.

Таким образом, в отличие от силанольной сшивки пероксидная технология позволяет получить достаточную степень сшивки по всей толщине изоляции, обеспечить отсутствие воздушных включений и триингоустойчивость, является более предпочтительной при переработке. С помощью пероксидной сшивки достигается стабильность электрических характеристик силовых кабелей всех классов напряжения.

Основные преимущества и недостатки рассматриваемых способов сшивки сведены в Табл. 6.

Кабели с СПЭ изоляцией на низкое напряжение (до 6 кВ) и изолированные провода энергетического назначения. Для кабелей на низкое напряжение во всем мире получила распространение сшивка при помощи



силанов в силу того, что использование пероксидной сшивки нерентабельно. Кроме того, с технологической точки зрения для реализации пероксидной технологии необходимо специальное громоздкое оборудование.

Кабели на низкое напряжение имеют небольшую толщину изоляции, которая может быть достаточно равномерно сшита силанольным способом. Для кабелей же с большой толщиной изоляции трудно добиться доступа влаги ко всему объему по глубине изоляции и, следовательно, равномерности ее сшивки.

В работе [48] исследованы свойства низковольтных кабелей (на напряжение до 1 кВ), проведено сравнение основных методов сшивки. Показано, что силанольная сшивка не дает высокой прочности связей и материал может легче деградировать, чем изоляция пероксидной сшивки. С практической стороны и с учетом технологических особенностей, размерных параметров конструктивных элементов, более низких требований по напряженности электрического поля, а также стоимостного фактора, силанольная сшивка для кабелей на низкое напряжение более выгодна и находит широкое применение.

По названным выше причинам силанольным способом производится изоляция для проводов энергетического назначения – самонесущих изолированных и защищенных проводов. Для таких проводов полиэтиленовая изоляция, имеющая небольшую толщину, силанольным способом сшивается равномерно, обладает достаточно гладкой поверхностью, что содействует предотвращению появления и распространения микротрещин и структурных неоднородностей, а также улучшению механических свойств изоляции проводов [49].

Анализ состояния производства самонесущих изолированных и защищенных проводов для воздушных линий электропередачи в странах СНГ проведен в работе [50].

Кабели с СПЭ изоляцией на среднее напряжение (от 6 до 36 кВ). В странах Западной Европы, США, Японии и др. силанольная сшивка полиэтиленовой изоляции для кабелей такого класса напряжения не применяется в связи с трудностью обеспечения однородности сшивки и равномерности в радиальном направлении изоляции, которая имеет достаточно большую толщину. Для кабелей на среднее напряжение используется исключительно пероксидная сшивка. Эта технология проверена временем, опытом длительной эксплуатации силовых кабелей и поэтому пользуется спросом в мире.

В [51] аргументируется, что пероксидная технология при высокой температуре позволяет достичь равномерности сшивки по всей толщине изоляции, что не может обеспечить силанольная сшивка, которая не предполагает использования высоких значений температуры и давления. Кроме того, преимуществом пероксидной технологии является одновременность осуществления экструзии и сшивки всех трех слоев изоляционной системы. Такая технология позволяет получить хорошую адгезию между полупроводящими экранами и основной изоляцией, отсутствие газовых включений в изоляции и на границе с экранами и в результате добиться стабильности электрических характеристик кабелей в процессе эксплуатации.

Ведущие западные производители кабелей всех классов и напряжения (ABB, Nexans, Tele-Fonika Kable и др.) оснащены линиями газовой вулканизации.

Результаты сравнения фирмой АВВ двух технологий производства кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена приведены в [52].

Кабели с СПЭ изоляцией на высокое и сверхвысокое напряжение (от 161 до 500 кВ). Для этих классов напряжения применяются сверхчистые композиционные материалы, а

Таблица 6. Сравнение способов сшивки по результатам работ [7, 9, 33, 41].

Критерий	Способы сшивки		
	Силанольная	Пероксидная	Радиационная
Гибкость процесса	высокая	низкая	высокая
Процесс	легкий	сложный	сложный
Экструдер	стандартный	специальный	стандартный
Производительность	высокая	низкая	высокая
Капиталовложения	небольшие	большие	большие
Преимущества	– низкая стоимость оборудования; – высокая производительность;	– высокая степень сшивки; – равномерное качество (> 80 %)	– высокая производительность; – легкая обработка
Недостатки	– малый срок годности материала при хранении (6 мес.); – низкая степень сшивки	– высокая стоимость оборудования; – низкая производительность	– высокая стоимость оборудования; – низкая производительность
Применение	трубы, провода, кабели низкого напряжения (до 3,3 кВ)	кабели среднего, высокого и сверхвысокого напряжения	листы, трубы, изделия низкого напряжения (до 1 кВ)



сшивки изоляции кабелей выполняется по пероксидной технологии, обеспечивающей высокое качество, надежность и длительный срок их эксплуатации. Производителями кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на высокое и сверхвысокое напряжение в мире являются кабельные заводы «Южкабель», «Севкабель», «Камкабель», ABB, Nexans, Brugg, Prysmian, Sudkabel, Reka Cables, Doha Cables, Tele-Fonika Kable, Silec Cable, LS Cable and System, Demirer Kablo, Taihan Electric Wire Co Ltd. и др.

Современные разработки. Надежность и срок эксплуатации силовых кабелей во многом зависят от качества используемых изоляционных и электропроводящих материалов, технологического оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры.

На сегодняшний день разрабатываются новые изоляционные композиционные материалы, создаются и изучаются триингостойкие полиэтиленовые и сополимерные материалы, усовершенствуются технологии экструдирования и сшивки изоляции, проводятся исследования в области свойств полимерных материалов, например, [1, 12, 14, 53–55]. Это создает предпосылки для дальнейшего совершенствования и развития процессов технологии производства силовых кабелей и, в целом, создания высококачественной и конкурентноспособной кабельно-проводниковой продукции на основе последних достижений в области материалов и оборудования.

Выводы и заключительные замечания. На основании обзора многочисленных мировых источников информации о применении сшитой полиэтиленовой изоляции в кабелях энергетического назначения всех классов напряжений по классификации МЭК – низкого (до 6 кВ), среднего (от 6 до 36 кВ), высокого (от 36 до 161 кВ) и сверхвысокого (от 161 до 500 кВ) можно заключить следующее.

1. В качестве изоляции кабелей энергетического назначения широко распространен полиэтилен пероксидной и силанольной сшивки.

2. Одним из показателей качества изоляции является степень равномерности сшивки. Более однородная сшивка по толщине изоляции достигается при пероксидной сшивке.

3. Исследования деградационных процессов под действием температуры и ультрафиолетового излучения подтверждают, что пероксидно-сшитый полиэтилен имеет более однородную структуру и менее чувствителен к деградации.

4. Экспериментальные исследования сшитой полиэтиленовой изоляции на наличие водных три-

ингов выявили, что изоляция на основе силанольной сшивки характеризуется более высоким содержанием воды (до 300 ppm) и большим количеством микронеоднородностей в своей структуре.

5. Результаты изучения степени старения полиэтиленовой изоляции по показателю электрической прочности показывают преимущество пероксидной сшивки.

6. Исследования термопластикации полиэтилена привели к выводу, что пероксидно-сшиваемый материал является более технологичным при переработке в силу более низкого содержания геля.

Приведенные в работе данные и выводы исследований могут быть полезны производителям кабелей и проводов, а также энергетикам и потребителям, составляют исходную информацию для научно-обоснованного выбора материалов и оборудования по их переработке, а также использования кабельно-проводниковой продукции, произведенной с применением той или иной технологии.

В настоящее время пероксидная технология сшивки полиэтилена проверена временем и опытом эксплуатации силовых кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений (от 6 до 500 кВ), востребована в мире. Такая технология обеспечивает стабильность электрических характеристик, а также надежность и долговечность кабелей в эксплуатации.

Технология силановой сшивки в мире используется для производства кабелей и проводов низкого напряжения (до 6 кВ), а также для изготовления самонесущих и защищенных проводов.

Европейскими стандартами не предусматриваются требования относительно проведения длительных (двухгодичных) испытаний в условиях повышенного воздействия влаги, температуры и напряжения для кабелей и проводов низкого напряжения.

В Украине пероксидная технология сшивки для производства кабелей энергетического назначения на напряжение от 6 до 330 кВ используется только на заводе «Южкабель», где действуют две линии пероксидной сшивки. Одна линия фирмы Troester (Германия) внедрена в 2003 году и предназначена для изготовления кабелей от 6 до 110 кВ. Другая линия фирмы Maillefer (Финляндия) вступила в строй в 2008 году и служит для производства кабелей на напряжение от 6 до 330 кВ.

В Украине имеется также несколько линий для производства кабелей и проводов низкого напряжения по технологии силанольной сшивки. Такие технологические линии установлены на



предприятиях «Южкабель» (г. Харьков), Бердянський кабельний завод (г. Бердянськ), Одескабель (г. Одесса) и применяются для производства самонесущих и защищенных проводов и силовых кабелей на напряжение не более 6 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Современная кабельная изоляция.* — <http://www.systeccables.ru/articles/9.html>
2. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. — К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. — 550 с.
3. *Suzuki A., Nakamura S., Matsuda M., Tanaka H.* Installation of the world's first 500 kV XLPE cable with intermediate joints // *Furukawa Review.* — 2000. — No. 19. — P. 115–122.
4. <http://www02.abb.com/global/ruabb/ruabb052.nsf/0/aba877956e74b657c1257498004363f4/>
5. <http://procable.com.ua/news/2336/>
6. *Макаров Е.Ф.* Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / В 6-ти томах. — М.: Папирус Про, 1999.
7. *Electrical power cable engineering.* — Third Edition / Ed. by W.A. Thue. — CRC Press: 2011. — 460 p.
8. *Peschke E., von Olshausen R.* Cable systems for high and extra-high voltage: development, manufacture, testing, installation and operation of cables and their accessories. — Berlin: Publicis MCD Verlag, 1999. — 196 p.
9. *Morshedian J., Hoseinpour P.M.* Polyethylene crosslinking by two-step silane method: a review // *Iranian Polymer Journal.* — 2009. — Vol. 18, No. 2. — P. 103–128.
10. *Ciuprina F., Filippini J.C., Teissedre G., Campus A.* Crosslinking and water treeing in polyethylene insulation // *Jicable'07 — Paris-Versailles, France.* — 24–28 June 2007 — 5 p. — http://www.jicable.org/2007/Actes/Session_C71/JIC07_C718.pdf
11. *Ciuprina F., Teissedre G., Filippini J.C.* Polyethylene crosslinking and water treeing // *Polymer.* — 2001. — Vol. 42, N18. — P. 7841–7846.
12. *Гук Д.А., Каменский М.К., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Шувалов М.Ю.* Новый высоковольтный испытательный центр ОАО «ВНИИКП». Опыт испытаний и исследований силовых кабелей, арматуры и материалов для их производства // *Кабели и провода.* — 2014. — № 5(348). — С. 35–42.
13. *Шувалов М.Ю., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Удовичицкий П.Ю., Мнека А.С.* Развитие водных трингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера. Ч. 1 // *Кабели и провода.* — 2006. — № 4 (299). — С. 14–19.
14. *Peshkov Iz. B., Shuvalov M. Yu., Ovsienko V.L.* Water treeing in extruded cable insulation as Reh binder electrical effect // *Journal of Information Technology and Applications.* — 2015. — No. 5. — Pp. 55–60.
15. *Shuvalov M., Ovsienko V., Obraztov Yu, Urbanczyk A., Bostrom J.O.* Water treeing test results for different XLPE compounds, obtained with needle techniques // *Jicable'07 — Paris-Versailles, France.* — 24–28 June 2007 — 6 p. — http://www.jicable.org/2007/Actes/Session_C71/JIC07_C717.pdf
16. *Hvidsten S., Holmgren B., Adeen L., Wetterstrom J.* Condition assessment of 12- and 24- kV XLPE cables installed during the 80s. Results from a joint Norwegian/Swedish

research project. // *IEEE Electrical Insulation Magazine.* — 2005. — Vol. 21, No. 6. — Pp. 17–23.

17. *Teysedre G., Laurent C.* Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years // *IEEE Electrical Insulation Magazine.* — 2013. — Vol. 29, No. 5. — P. 26–36.
18. *Footit E.* Statistical, electrical and mathematical analysis of water treed cross-linked polyethylene cable insulation // *Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the School of Engineering Systems Science and Engineering Faculty at the Queensland University of Technology.* — Brisbane, Australia. — 2015. — 214 p.
19. *Doedens E.H.* Organic Contaminants in Crosslinked Polyethylene for Demanding High Voltage Applications // *Diploma work No. 83/2012 in the Master programme of Electric Power Engineering at the Department of Materials and Manufacturing Technology Chalmers University of Technology.* — Gothenburg, Sweden. — 2012. — 86 p.
20. *Щерба А.А., Кучерявая И.Н., Кирик В.В., Цыганенко Б.В.* Мировой опыт применения сшитой полиэтиленовой изоляции для производства силовых кабелей разных классов напряжения // *Электрические сети и системы.* — 2015. — № 5. — С. 11–20.
21. *Образцов Ю.В.* Отечественные кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена для линий электропередач // *Кабель-News.* — 2009–2010. — № 12–1. — С. 45–49.
22. *Makuuchi K., Cheng S.* Radiation processing of polymer materials and its industrial applications. — Publ. by John Wiley & Sons, 2012. — 444 p.
23. *Shyichuk A., Shyichuk I., Wu S., Katsumura Y.* Quantitative analysis of the temperature effect on the radiation crosslinking and scission of macromolecules // *Journal of Polymer Science Part A.* — 2001. — Vol 39, Is. 10. — P. 1656–1661.
24. *Каменский М.К.* Применение полимерных материалов на предприятиях Ассоциации «Электрокабель» // *Кабель-News.* — 2010. — № 3. — с. 55–61.
25. *Решения для производства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.* — Borealis AG Borouge Pte Ltd., 2011. — <http://www.tehplastik.ru/files>
26. *Карпушенко В.П., Золотарев В.В., Чопов Е.Ю., Бузько С.В.* Электрическая система испытаний силовых кабелей всех классов напряжений с изоляцией из сшитого полиэтилена // *Электротехника і Електромеханіка.* — 2013. — № 4. — С. 60–64.
27. <http://www.yuzhcable.info/>
28. *Densley J.* Ageing mechanisms and diagnostics for power cable. An overview // *IEEE Electrical Insulation Magazine.* — 2001. — Vol. 17, No. 1. — P. 14–22.
29. *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical degradation and breakdown in polymers. — London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. — 601 p.
30. *Sourki F.A., Morshedian J.* On the improvement of physical and mechanical properties of polyethylene by cross-linking // *Bimonthly Iranian Journal of Polymer Science and Technology.* — 2001. — Vol 14, № 2. — P. 95–100.
31. *Леннанен Й., Чамов А.В.* Технология изолирования кабелей среднего напряжения повышенной надежности // *Кабели и провода.* — 2005. — № 5(295). — С. 32–34.
32. *ABB Moskabel Quality Dep.* — Technology. — <http://www.tyret.ru/userfiles/file/doc/cable/tex%20shivki.pdf>
33. *Polylink (Crosslinkable Polyethylene)* Hyundai Engineering Plastics Co., Ltd. Research & Development Center — <http://www.ecpl.ru/articles/Polylink.pdf>



34. Карпушенко В.П. О влиянии способа вулканизации на надежность и срок службы силовых кабелей // Электропанорама. — 2012. — № 9. — С. 18–20.
35. Щерба А.А., Гурин А.Г., Ольшевский А.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Новая технология пероксидной сшивки полиэтиленовой изоляции — основа производства высоконадежных силовых кабелей на напряжение 6–500 кВ // Электропанорама. — 2012. — № 4. — С. 16–21.
36. Nexans Technical Review — October 2004. — http://www.nexans.com/eservice/Corporateen/fileLibrary/Download_540073071/eService/files/tech_review2d.pdf
37. IEC 60502-2. Part 1. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). — Reference number IEC 60502-2:2005(E). — Second Edition, 2005-03. — 160 p.
38. International Standard IEC 60885-3 Electrical test methods for electric cables — Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables. — Edition 2.0 — 2015-04. — https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60885-3%7Bed2.0%7Db.pdf
39. Кожевников А. Производство СПЭ кабелей // Новосты Электротехники. — 2004. — № 2 (26). — <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/26/50.php>
40. Venkatraman S., Kleiner L. Properties of three types of crosslinked polyethylene // Advances in Polymer Technology. — 1989. — Vol. 9, Is. 3. — p. 265–270.
41. Drobny J.G. Ionizing radiation and polymers: principles, technology, and applications. — Elsevier Inc., William Andrew Publishing, 2013. — 320 p.
42. Celina M., George G.A. Characterisation and degradation studies of peroxide and silane crosslinked polyethylene // Polymer Degradation and Stability. — 1995. — Vol. 48, Is. 2. — P. 297–312.
43. Hussin N. The effects of crosslinking byproducts on the electrical properties of low density polyethylene // University of Southampton, Faculty of physics and applied sciences. — A thesis submitted for PhD — September 2011. — 162 p. — http://eprints.soton.ac.uk/201957/1.hasCoversheetVersion/Final_Thesis_NH_-_CD_version.pdf
44. Barber K.W., Marazzato H. Reliable undergrounding of electricity supply in Asia // Asia Pacific Conference on MV Power Cable Technologies. — 6-8 September 2005. — 10 p. — http://www.olex.com.au/eservice/Australiaen_AU/navigatepub_158512_-31524/Reliable_Undergrounding_of_Electricity_Supply_in_A.html
45. Recycling plastic from cable waste. — Borealis AG, 2014, Borealis Pte Ltd — WC HO 501 GB 2014 03 BB — 2 p. — <http://www.borealisgroup.com/Global/Polyolefins/Energy%20Infrastructure/Cables/medium-voltage-mv-cables/recycling-plastic-from-cable-waste.pdf>
46. Sekiguchi Y., Ohkawa N., Nojo H., Hashimoto S. Development of recycling technology of XLPE // Jicable'07 — Paris-Versailles, France. — 24–28 June 2007 — http://www.jicable.org/2007/Actes/Session_C51/JIC07_C516.pdf
47. Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Kenji Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene // Furukawa review. — 2003. — No. 23. — P. 88–93. — http://www.furukawa.co.jp/review/fr023/fr23_17.pdf
48. York R.J., Ulrich J.B., Murphy G., Prather D.G. Mitigation of aging in low voltage power cables in nuclear power plants // Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville. — 2015. — 26 p. — http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2890&context=utk_chanhonoproj
49. Ким В.С. Исследование влияния технологических факторов производства самонесущих изолированных проводов на механические свойства изоляции из сшитого полиэтилена // Наукоедение (Интернет-журнал). — 2013. — № 3. — <http://naukovedenie.ru/PDF/66tvn313.pdf>
50. Зиниуков С.В., Подгайский С.И. Анализ рынка самонесущих изолированных и защищенных проводов для воздушных линий электропередачи в России и странах СНГ. Проблемы, состояние, перспективы развития производства и спроса // Кабели и провода. — 2006. — № 6(349).
51. Современные решения в области силовых кабелей. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена среднего и высокого напряжения. — 2007. — 28 с. — <http://www.systeccables.ru/u/f/doc/32dfa0fb4e82a06decc5209c3f90c8f3.pdf>
52. Изготовление и применение кабеля с СПЭ-изоляцией. BU CablesMarketing & Sales. — ABB BU Cables M&S — 1. — 24 p. — <http://www.tyret.ru/userfiles/file/doc/cable/Prezent.pdf>
53. Aarts M.W., Kjellqvist J.B., Mendelsohn A., Vaterrodt K. The performance of XLPE water tree resistant insulation systems against the requirements of DIN VDE 0276-605/A3 // 18-th International Conference on Electricity Distribution. — Turin, 6–9 June 2005. — 6 p. — http://www.researchgate.net/publication/224122961_The_performance_of_XLPE_water_tree_resistant_insulation_systems_against_the_requirements_of_DIN_VDE_0276605A3
54. Hellstrom S., Bergfors F., Laurensen P., Robinson J. Aging of silane crosslinked polyethylene // IEEE Access. — 2014. — Vol. 2. — P. 177–182.
55. Hill J., Tan S., Rider C., Labbe D. Development of a new liquid antioxidant for stabilizing XLPE compounds or for direct peroxide injection (DPI) process // 9th International Conference on Insulated Power Cables F6.1.02. — Jicable'15 — Versailles 21–25 June, 2015. — 5 p. — http://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2015/2015-F6-1-02_page1.pdf

