



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ТИПИЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выполняется двумерное компьютерное моделирование электрического поля в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с типичными дефектами - трещиной в основной изоляции, надрезом изоляции, выступом полупроводящего слоя по жиле, его неплотным прилеганием к изоляции, пустотами во внешнем полупроводящем слое, его отслоением от медного экрана, воздушным промежутком в медном экране, связанным с коррозией материала. Моделирование и исследование проводятся с использованием элементарной ячейки периодической структуры поперечного сечения кабеля. Показаны усиление электрического поля и преломление линий равного потенциала в зоне расположения структурных дефектов.

К л ю ч о в ы е с л о в а: полиэтиленовая изоляция, структурные дефекты, усиление электрического поля, элементарная ячейка, компьютерное моделирование.

Введение. В современной мировой практике широко используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (с СПЭ изоляцией). Такие кабели на сверхвысокое напряжение 500 кВ проложены и эксплуатируются, например, на токийской ГАЭС Kazunogawa, Бурейской ГЭС в России, в Эквадоре на реке Кока, на китайской гидроэлектростанции Дачаошан действуют кабели на напряжение 525 кВ [1–3]. Обеспечение высокой надежности высоковольтных кабелей на ответственных промышленных и энергетических объектах, в том числе гидроэлектростанциях, является крайне важной и актуальной задачей.

Надежность и долговечность электрических кабелей в значительной степени зависят от степени бездефектности составляющих элементов, что достигается путем соблюдения надлежащих требований современных технологических процессов изготовления, условий прокладки и соединения кабелей, а также условий и режимов их эксплуатации. Во многом надежность кабелей связана с состоянием и интенсивностью старения полиэтиленовой изоляции [4, 5].

Структурная неоднородность большей по толщине и объему полиэтиленовой изоляции для более высокого уровня напряжения кабелей увеличивается. Наличие дефектов конструкции (Рис. 1) способно влиять на функциональность элементов кабелей, снижать электрическую прочность изоляции, ограничивать их надежность и ресурс эксплуатации [4–7]. Это обуславливает необходимость теоретического и практического изучения структурных дефектов кабелей и на такой основе выработку технологических мер сокращения количества и размеров дефектов.

Начиная с центра, кабель с СПЭ изоляцией состоит (Рис. 2, а) из токопроводящей жилы, полупроводящего слоя по жиле (внутреннего слоя),

основной изоляции, внешнего полупроводящего слоя, металлического экрана и неметаллической наружной оболочки. Полупроводящие слои играют важную роль в поддержании нормальной работы кабелей. Они предназначаются для выравнивания скачка напряженности электрического поля между жилой и изоляцией, а также между изоляцией и экраном. Кроме того, полупроводящий слой накладывается для сглаживания поверхности жилы с целью снижения напряженности электрического поля у ее границы. Для изготовления полупроводящих слоев выбирается материал с более высокой по отношению к основной изоляции электропроводностью.

Структура изоляции кабелей характеризуется наличием ряда объемных и поверхностных дефектов. К поверхностным дефектам относятся неровности полупроводящих слоев, например, из-за неровности поверхности прилегающей жилы. Объемными дефектами являются посторонние включения (проводящие и непроводящие), а также воздушные полости в полиэтиленовом материале (Рис. 1, а).

К возможным причинам образования пустот и загрязнений в изоляции относятся несовершенство технологического процесса — недостаточная чистота используемых при изготовлении гранул полиэтилена, несоблюдение температурного режима, а также неплотное прилегание полупроводящих слоев к основной изоляции. Микроразмерные включения, как и другие дефекты, вызывают локальное возмущение электрического поля, являются центрами зарождения и роста триингов, могут быть причиной пороговых электрофизических явлений, на начальных этапах разрушающих изоляцию на микроуровне [4, 5, 8, 9]. Развитие водных триингов является одной из основных причин увеличения уровня частичных разрядов при эксплуатации кабелей с СПЭ изоляцией. Частичные раз-

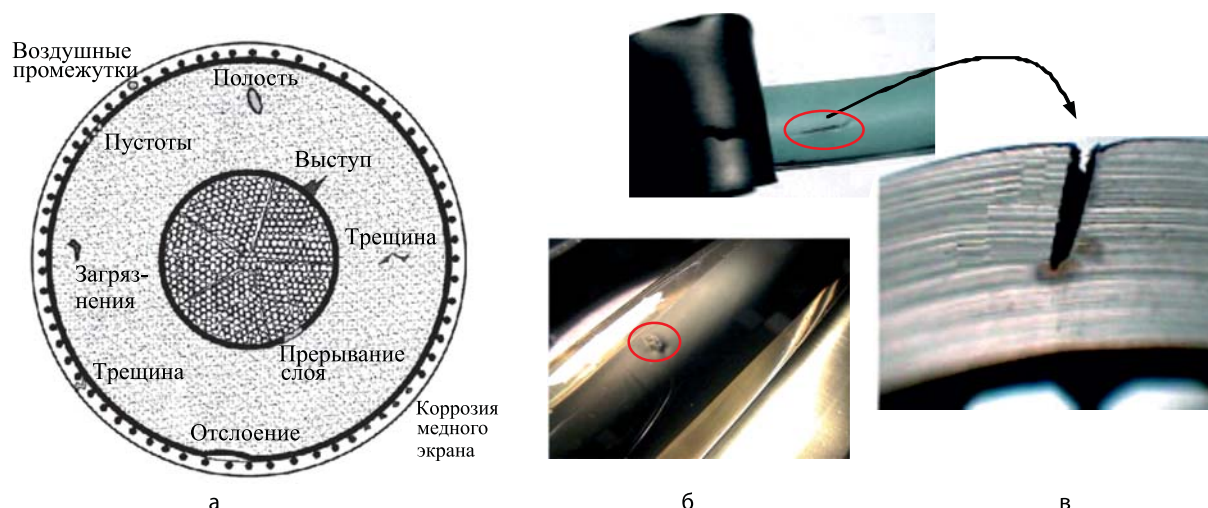


Рис. 1. Характерные дефекты силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [4, 9] (а); дефект полупроводящего слоя по жиле [6] (б); глубокий надрез, более 50% изоляции, образованный при установке [9] (в).

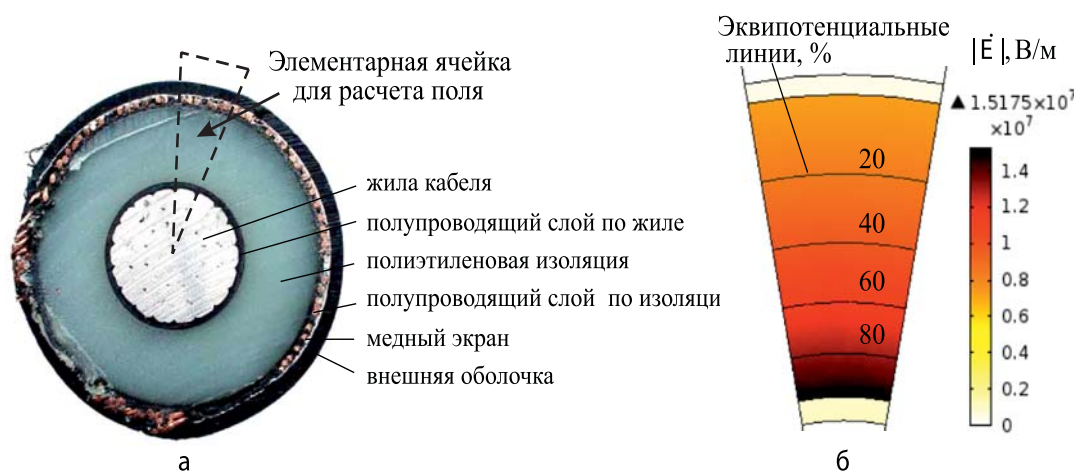


Рис. 2. Структура силового кабеля с выделенной элементарной ячейкой (а); распределение электрического поля и эквипотенциальные линии в изоляции без дефектов (б).

ряды возникают, когда локальная напряженность электрического поля превосходит диэлектрическую прочность изоляции, например, в зонах расположения электрических триингов, микропустот, срезов, трещин, выступов, отслоений, загрязнений с плохой адгезией с материалом изоляции.

В работе [8] методами видеомикроскопии и микроэксперимента изучены различные типы дефектов: микровыступы полупроводящего слоя в изоляцию, проводящие и диэлектрические микровключения, водные полости в изоляции; определена локальная прочность изоляции с дефектами. Показано, что дефекты являются источниками механизмов электрической деструкции изоляции — водных и электрических триингов. В работах [7, 10] проведено двух- и трехмерное компьютерное моделирование электрического поля в полиэтиленовой изоляции кабелей с поверхностными и объемными дефектами (водными и воздушными микровключениями, триинговыми структурами, микровыступами в изоляцию), дана оценка степени неоднородности поля в их окрестности.

Металлический экран, расположенный поверх внешнего полупроводящего слоя, предотвра-

щает распространение электрического поля за пределы кабеля и защищает кабель от токов короткого замыкания на землю. Коррозия — одна из проблем медного экрана, которая проявляется в присутствии воды и при коррозионной активности почвы для кабелей подземной прокладки. Внешняя неметаллическая оболочка защищает кабель от механических, тепловых, химических воздействий и проникновения в его объем влаги.

Основные дефекты кабелей с СПЭ изоляцией показаны на Рис. 1. На развитие дефектов влияют следующие факторы, связанные между собой: электрическое поле, проникновение влаги, механические воздействия, время. Они приводят, как правило, к снижению электрической прочности изоляции. Вследствие электрических, тепловых, механических нагрузок и особенностей окружающей среды, при старении изоляции со временем происходят изменения ее свойств и структуры. К примеру, под электрическим старением изоляции подразумевается деградация материала вследствие водных и электрических триингов, возникновения частичных разрядов. Необходимость сведения к минимуму количества дефектов и по возможности



Полиэтиленовая изоляция

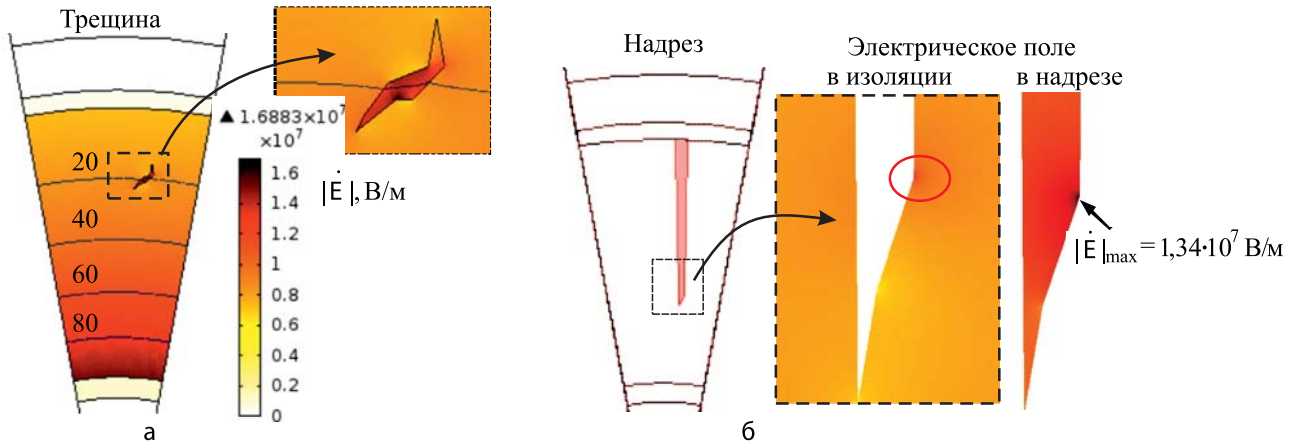


Рис. 3. Распределение электрического поля и эквипотенциальные линии в основной изоляции кабеля с трещиной (а) и надрезом (б).
Внутренний полупроводящий слой

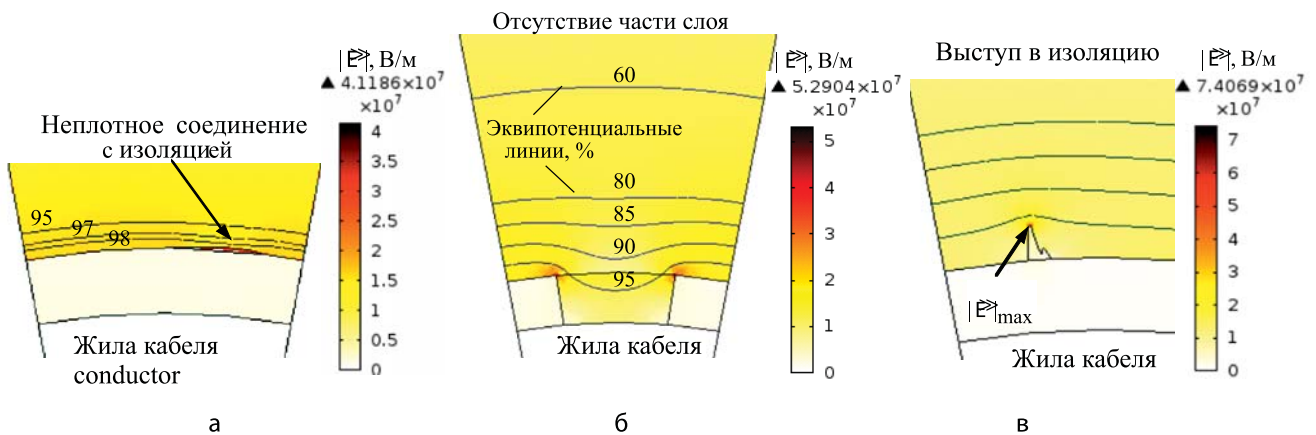


Рис. 4. Распределение электрического поля и эквипотенциальные линии в изоляции в случаях: неплотного соединения полупроводящего слоя с изоляцией (а); отсутствия части этого слоя (б); выступа слоя в изоляцию (в).

Внешний полупроводящий слой

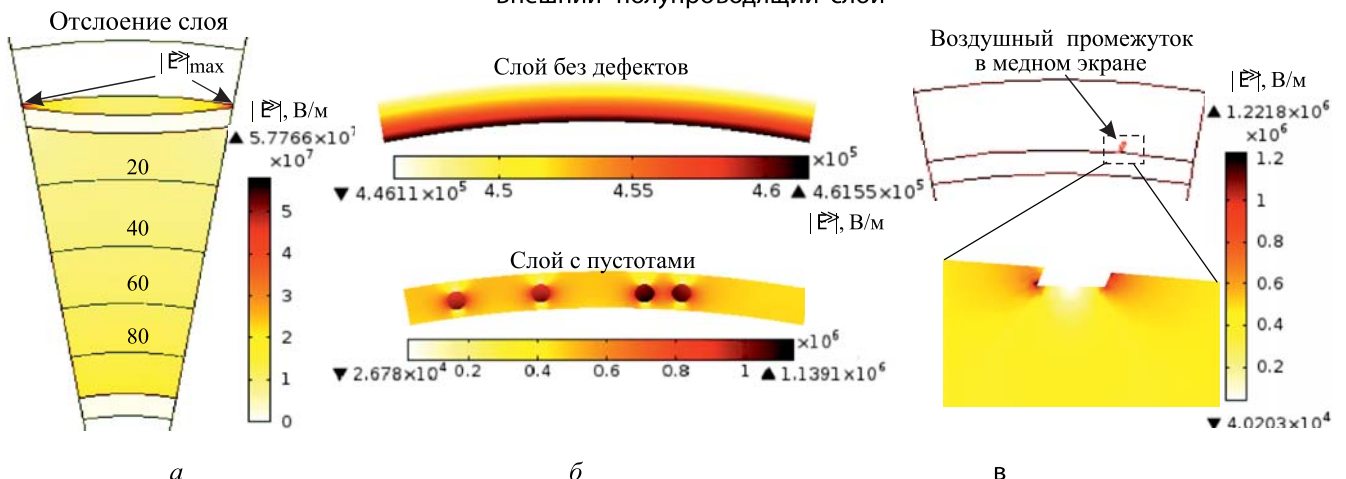


Рис. 5. Распределение электрического поля и эквипотенциальные линии в изоляционной структуре при отслоении внешнего полупроводящего слоя (а); во внешнем полупроводящем слое при наличии в нем пустот и без них (б) и в случае воздушного промежутка на границе полупроводящего слоя вследствие коррозии медного экрана (в).

подавление процесса триингообразования учитывается при конструировании кабелей с СПЭ изоляцией и разработке технологии их изготовления.

Структурные дефекты подразделяются на:

- заводские дефекты и дефекты конструкции (микровключения, загрязнения, трещины, заниженное сечение жил кабеля и др.);

- дефекты прокладки (механические напряжения и связанное с ними трещинообразование, недопустимые изгибы, механические повреждения — надрезы, вмятины, изломы и др.);

- эксплуатационные дефекты (проникновение влаги, триинги, коррозия экрана, нарушение герметичности кабеля, дефекты из-за длительных



токовых перегрузок, перегрева, изменений напряжения в системе, агрессивности окружающей среды, влияния ее температуры, теплового сопротивления грунта и др.).

Все из перечисленных дефектов приводят к ускоренному износу изоляции и сокращению срока службы кабеля.

Целью работы является исследование с помощью компьютерного моделирования электрического поля вблизи типичных дефектов силовых кабелей с СПЭ изоляцией – трещины в изоляции и глубоким надрезом в ней (Рис. 1, в), отсутствия части полупроводящего слоя по жиле, выступа этого слоя в изоляцию (Рис. 1, б), отслоения внешнего полупроводящего слоя и наличия воздушных пустот в нем, воздушного промежутка в медном экране из-за коррозии материала (Рис. 1, а). Компьютерные расчеты проводятся с использованием положений многомасштабного моделирования [11] в стандартной программе Comsol [12], в которой реализуется метод конечных элементов.

Описание задачи и модель для расчетов. Для моделирования выбирается кабель с СПЭ изоляцией марки АпвЭгаП 1х500/95 на напряжение 110 кВ, сечение которого показано на Рис. 2, а. Исследование электрического поля в СПЭ изоляции с дефектами проводится с помощью выделения из ряда одинаковых секторов в сечении кабеля одного сектора, который представляет собой элементарную ячейку периодической структуры [11], показанную на Рис. 2, а. В таком случае картина поля во всем сечении кабеля воспроизводится путем периодического повторения по угловой координате распределения поля в элементарной ячейке. Рассмотрение элементарной ячейки и предположение о том, что моделируемые дефекты кабеля имеют место во всех секторах его сечения, могут быть приняты, поскольку увеличение электрического поля происходит лишь в локальных областях вблизи дефектов и в отдельных случаях (например, при отслоении внешнего полупроводящего слоя) слабо влияет на распределение поля в соседних секторах.

Задача рассматривается в декартовой системе координат в двумерной постановке при условии, что рассматриваемые дефекты имеют достаточную протяженность по длине кабеля.

Расчетная область включает элементы, входящие в элементарную ячейку поперечного сечения кабеля, – основную изоляцию кабеля, полупроводящие слои и медный экран. В области жилы и наружной оболочки электрическая задача не решается.

Основным уравнением модели является дифференциальное уравнение для электрического потенциала ϕ :

$$\nabla (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi = 0, \quad (1)$$

где ϵ_0 и ϵ_r – соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость (комплексная величина в общем случае); σ – электропроводность соответствующего материала; $\omega = 314$ рад/с – угловая частота; точкой наверху обозначаются комплексные величины.

В модели пренебрегается влиянием объемного электрического заряда, инжектируемого с поверхности жилы и медного экрана в изоляцию. Задаются различные значения электрических параметров ϵ_r и σ в различных элементах кабеля.

В качестве граничных условий на поверхности жилы выбирается $\dot{\phi} = U_m$ (U_m – амплитудное значение фазного напряжения); на поверхности медного экрана – потенциал $\dot{\phi} = 0$; на боковых границах элементарной ячейки – условие Неймана $\partial\phi/\partial n$ (n – единичный вектор внешней нормали).

После определения потенциала $\dot{\phi}$ напряженность электрического поля рассчитывается как $\dot{E} = -\nabla\dot{\phi}$.

Результаты компьютерного моделирования. Исследуемый одножильный кабель с СПЭ изоляцией на напряжение 110 кВ имеет сечение жилы 500 мм² (диаметр жилы 25,2 мм), толщину изоляции 16 мм, сечение экрана из медных лент 35 мм² (толщину экрана 4 мм). Толщина полупроводящих слоев составляет 1 мм.

В модели принимаются значения электропроводности основной изоляции $\sigma_1 = 10^{-15}$ (Ом·м)⁻¹, электропроводности полупроводящих слоев $\sigma_2 = 10^{-7}$ (Ом·м)⁻¹, диэлектрической проницаемости материалов $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2,3$, частота – 50 Гц.

Распределение электрического поля и эквипотенциальные линии в изоляции кабеля без дефектов показаны на Рис. 2, б. Здесь, как и на Рис. 3–5, указаны значения потенциала в процентах по отношению к напряжению на жиле U_m , принятого 100%.

На Рис. 3 приведены картины поля и эквипотенциальные линии в основной изоляции кабеля и в отдельных ее фрагментах с трещиной (Рис. 3, а) и глубоким надрезом (Рис. 3, б), который моделирует ситуацию на Рис. 1, в. Как видно, в зоне расположения дефектов линии равного потенциала искажаются, напряженность поля увеличивается.

Опасными, с точки зрения увеличения напряженности электрического поля, являются также дефекты: неплотное соединение полупроводящего слоя с полиэтиленовой изоляцией (Рис. 4, а),



отсутствие части полупроводящего слоя по жиле (Рис. 4, б), выступ этого слоя в изоляцию (Рис. 4, в), отслоение внешнего полупроводящего слоя (Рис. 5, а). Как показано, зазор между полупроводящим слоем и изоляцией, прерывание полупроводящего слоя и наличие выступов на поверхности изоляции кабеля приводят к снижению электрической прочности ее границы. Отслоение внешнего полупроводящего слоя вызывает резкое возрастание напряженности поля в местах начала отслоения, в зонах остающегося еще контакта с медным экраном (Рис. 5, а). Наибольшее значение поля имеет место на заостренной вершине выступа полупроводящего слоя (Рис. 4, в). Это ослабленная зона изоляции, находящаяся достаточно близко к жиле и характеризующаяся низкой электрической прочностью.

Электрическое поле во внешнем полупроводящем слое при наличии пустот, заполненных воздухом, и без них, а также в случае малого воздушного промежутка на границе полупроводящего слоя вследствие коррозии медного экрана отображено на Рис. 5, б и в, соответственно. В последнем случае поле показано только в полупроводящем слое, исключая часть воздушного промежутка, выступающего в его область. Как видно, такие дефекты не влияют непосредственно на электрическое поле в основной изоляции, однако при учете фактора времени могут приводить к влиянию на его распределение. Например, в случае коррозии (моделируется на Рис. 5, в) на границе металлического экрана могут возникать электрические разряды, приводящие к эрозии внешнего полупроводящего слоя, а впоследствии и к разрушению изоляции.

Путем компьютерного моделирования выявлено также, что наличие внутренних трещин в медном экране не оказывает непосредственного влияния на распределение электрического поля в изоляции кабеля.

Заключение. Исследован характер распределения электрического поля в многослойной полиэтиленовой изоляции высоковольтного кабеля с учетом наличия характерных дефектов в структуре.

Расчетным путем показано, что ослабленные зоны изоляции с высокой напряженностью электрического поля формируются вследствие наличия в изоляции трещин и надрезов (Рис. 3), неплотного прилегания и прерывания внутреннего полупроводящего слоя и его острых выступов в изоляцию (Рис. 4). Такие дефекты способны снизить электрическую прочность изоляции и приводить к ее деградации.

Отслоение внешнего полупроводящего слоя от металлического экрана приводит к резкому возрастанию напряженности поля в зонах начала

отслоения (Рис. 5, а). Пустоты с воздухом во внешнем полупроводящем слое и воздушный промежуток в металлическом экране из-за его коррозии (Рис. 5, б, в) в процессе эксплуатации кабеля не искажают электрическое поле в основной изоляции, а изменяют лишь конфигурацию поля в самом полупроводящем слое, однако в течение длительного времени могут приводить к влиянию на распределение поля и в изоляции.

Наименее опасными, с точки зрения влияния на поле в изоляции, являются внутренние пустоты и трещины в медном экране.

Показана важность достижения на практике низкой дефектности элементов кабеля для предотвращения локальных неоднородностей электрического поля в полиэтиленовой изоляции и, как следствие, ее возможного ускоренного старения. Это должно учитываться при конструировании кабелей с СПЭ изоляцией, разработке технологии их изготовления и при эксплуатации кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Современные* решения в области силовых кабелей. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена среднего и высокого напряжения. — АВВ, 2007. — 28 с. — <http://www.systemcables.ru/uf/doc/32dfa0fb4e82a06decc5209c3f90c8f3.pdf>
2. *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.
3. <http://procable.com.ua/news/2336/>
4. *Hampton N.* HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. — University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC — National Electric Energy Testing, Research and Application Center. — Georgia Tech Research Corporation, February 2016. — 19 p. — http://www.cdfi.gatech.edu/publications/3-HV-Issues-7_with-Copyright.pdf
5. *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical degradation and breakdown in polymers. — London: Peter Peregrinus Ltd. for IEEE, 1992. — 601 p.
6. *Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachandran R.* Long-life XLPE insulated power cable. — *JiCable* 2007. — http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf
7. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. — К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. — 550 с.
8. *Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л.* Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // *Электричество*. — 2000. — № 5. — С. 49–57.
9. *Mashikian M. S., Szatkowski A.* Medium voltage cable defects revealed by offline partial discharge testing at power frequency // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. — 2006. — Vol. 22, No. 4. — P. 24–32.
10. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Мультифизические процессы в области включения в полиэтиленовой изоляции силового кабеля (трехмерное моделирование и эксперимент) // *Технічна електродинаміка*, — 2015. — № 3. — С. 3–9.
11. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Многомасштабное моделирование в электротехнике. — К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. — 256 с.
12. *Comsol* multiphysics modeling and simulation software — <http://www.comsol.com/>

© Кучерявая И.Н., 2017