

А.В. Беспрозванных, И.А. Мирчук

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КАБЕЛЕЙ С РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ БЕЗГАЛОГЕННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ

Досліджено вплив коефіцієнта опромінення прискореними електронами з енергією 0,5 МеВ на механічні та електричні характеристики кабельної високонаповненої антипіренами ізоляції, що не розповсюджує горіння, на основі сополімера етиленвінілацетата. Встановлено сильний кореляційний зв'язок між відносним подовженням при розриві і міцністю при розтягуванні, між опором ізоляції і пробивною напругою. Показано, що при оптимальному значенні коефіцієнта опромінення в діапазоні від 7 до 5, опір ізоляції зростає більш ніж в два рази, а пробивна напруга на постійному струмі – в 1,3 рази. Відносне подовження при розриві залишається в межах допустимих значень. Бібл. 12, рис. 3

Ключові слова: безгалогенна композиція, радіаційне модифікування, коефіцієнт опромінення, механічні та електричні характеристики, коефіцієнт кореляції.

Исследовано влияние коэффициента облучения ускоренными электронами с энергией 0,5 МэВ на механические и электрические характеристики кабельной высоконаполненной антипиренными изоляции из не распространяющей горение безгалогенной композиции на основе сополимера этиленвинилацетата. Установлена сильная корреляционная связь между относительным удлинением при разрыве и прочностью при растяжении, между сопротивлением изоляции и пробивным напряжением. Показано, что при оптимальном значении коэффициента облучения в диапазоне от 7 до 5 сопротивление изоляции возрастает более чем в два раза, а пробивное напряжение на постоянном токе – в 1,3 раза. Относительное удлинение при разрыве остается в пределах допустимых значений. Библ. 12, рис. 3.

Ключевые слова: безгалогенная композиция, радиационное модифицирование, коэффициент облучения, механические и электрические характеристики, коэффициент корреляции.

Введение. Высокая насыщенность кабельными трассами атомных и тепловых станций, ветропарков и солнечных электростанций, бортовых систем предъявляет жесткие требования в области пожарной безопасности кабелей [1]. Все это вызывает необходимость применения для изоляции и оболочки кабелей материалов нового класса, таких как безгалогенные композиции. Термин «безгалогенная композиция» не является строгим обозначением полимера с технической точки зрения, как, например полиэтилен или поливинилхлорид. Однако этот термин применяется в кабельной отрасли и фактически представляет собой отдельный класс материалов [1]. Безгалогенные композиции представляют собой полимерные материалы, в составе которых отсутствуют или имеются в очень малом количестве (менее 0,5 % масс.) галогены, и которые не распространяют горение при воздействии огня. Отсутствие галогенов в изоляции, заполнении и оболочке кабелей является одной из важнейших характеристик их пожарной безопасности. Для обеспечения высокой стойкости к распространению горения полимер наполняют большим количеством (до 70 % масс.) неорганических антипиренов (в основном гидроксиды алюминия или магния). Однако введение антипиренов обуславливает обязательное модифицирование (сшивку) полимерной матрицы, которое приводит к созданию пространственной структуры. Наиболее предпочтительным методом сшивки является радиационное модифицирование [2-4], при котором вероятность образования низкомолекулярных продуктов, в том числе и влаги, значительно меньше в сравнении с химическим методом [5].

Источниками ионизирующего излучения для модифицирования полимерной изоляции кабелей и проводов с сечением жилы до 240 мм² являются электронные ускорители с энергиями (0,3-5) МэВ и мощностью до сотен кВт [6, 7].

Необходимая доза для сшивания полиэтилена составляет 20-40 Мрад [5, 8-11]. Для фторполимеров – от (0,5-2) до (20-30) Мрад [5]. Сшивка полимеров позволяет значительно повысить их механическую прочность, теплостойкость, стойкость к воздействию химических активных веществ, растрескиванию [8-11].

Наибольший интерес в качестве безгалогенных композиций представляют композиции на основе сополимеров этилена (этилен-винилацетат, этилен-акрилат, этилен-пропилен и др.) с введением в полимерную матрицу антипиренов и других добавок, повышающих стойкость материала к распространению горения, а также лучшему диспергированию наполнителей в полимере [12].

Наличие в макромолекуле этиленовых звеньев, а также двойных связей, обеспечивают полимерной композиции на основе сополимера этиленвинилацетата, также как и полиэтилена, сшивку под воздействием ионизирующего излучения. Доза облучения определяется на стадии исследования кабельной композиции и разработки кабеля.

Цель статьи – определение оптимальной дозы облучения на основе корреляции между механическими и электрическими характеристиками радиационно-модифицированной безгалогенной на основе сополимера этиленвинилацетата высоконаполненной антипиренами изоляции кабелей.

Технологические параметры радиационного модифицирования. При облучении в результате ионизации молекул и разрыва связей С-Н в полимере образуются свободные макрорадикалы и атомарный водород. В результате дальнейшей рекомбинации макрорадикалов и образования поперечных связей между макромолекулами полимер приобретает трехмерную (пространственную) структуру. Однако при облучении протекает не только процесс сшивания

© А.В. Беспрозванных, И.А. Мирчук

макромолекул, но и процесс их деструкции, обусловленный разрывом валентных связей в макромолекуле. Возможность осуществления радиационной сшивки полимера определяется соотношением скоростей процессов «сшивка – деструкция» и зависит от того, какой из этих процессов преобладает.

Значительное влияние на соотношение процессов сшивки и деструкции влияют технологические параметры радиационного модифицирования и, как следствие, доза облучения.

При фиксированном напряжении ускорителя электронов технологическая доза облучения прямо пропорциональна току пучка электронов и обратно пропорциональна скорости прохождения кабеля под этим пучком [5]:
$$D = \frac{120 \cdot I \cdot N}{L V}, \text{ МРад, где } I \text{ – ток пучка}$$

электронов (мА), N – число проходов провода под пучком электронов, L – длина развертки пучка перпендикулярно направлению протяжки заготовки, V – скорость прохождения под пучком электронов (м/мин).

На практике при радиационном модифицировании изоляции и оболочек кабелей используют коэффициент облучения (K), который регулируется изменением скорости прохода кабеля под пучком электронов при неизменном токе пучка электронов: чем выше K , тем меньше степень облучения материала [5]. Коэффициент облучения является результатом компромисса между механическими и электрическими свойствами изоляции и техническими требованиями, предъявляемыми к готовому кабелю.

Для обеспечения равномерной сшивки по всему объему изоляции необходимым условием является стабильность работы ускорителя, что обуславливает постоянство параметров электронного пучка.

Тестовые образцы и параметры облучения. На промышленном ускорителе заряженных частиц ЕЛВ-1 выполнено радиационное модифицирование образцов изолированного провода длиной 5 м с медными жилами сечением 1,0 мм² (рис. 1). Изоляция толщиной 0,7 мм – высоконаполненная до 70 % массовых долей антипиренами безгалогенная композиция на основе сополимера этиленвинилацетата. Образцы провода облучены с разными коэффициентами облучения K : 17; 15; 13; 11; 10; 9; 8; 7; 6; 5 и 4 при энергии ускоренных электронов 0,5 МэВ. Один образец – контрольный (не подвергался облучению). Ток пучка электронов – 10 мА. Количество проходов провода под пучком электронов – 80.

Корреляция между электрическими и механическими характеристиками радиационно-сшитой изоляции. В исходном состоянии (до облучения) и после воздействия проведены механические и электрические испытания образцов провода.

На рис. 2 представлены корреляционные зависимости от коэффициента облучения механических (рис. 2,а) и электрических (рис. 2,б) характеристик: относительного удлинения при разрыве $\Delta\varepsilon$ и прочности при растяжении σ (рис. 2,а); сопротивления изоляции R_{ins} и пробивного напряжения U_{br} (рис. 2,б) соответственно.



Рис. 1. Компоновка электронного ускорителя для облучения изоляции кабелей и проводов

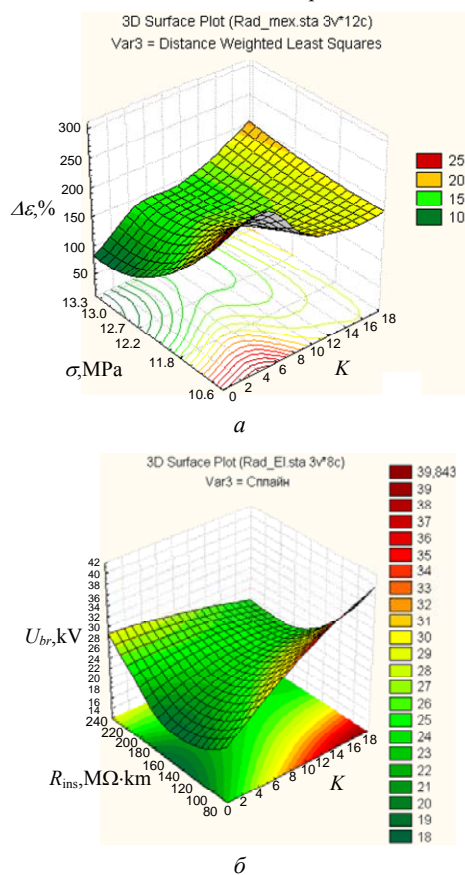


Рис. 2. К установлению корреляционной зависимости между механическими (а) и электрическими (б) характеристиками радиационно-сшитой изоляции

Для механических и электрических характеристик наблюдается сильная корреляционная связь. Причем, между относительным удлинением при разрыве и прочностью при растяжении – отрицательная; сопротивлением изоляции и пробивным напряжением – положительная. Коэффициенты корреляции равны -0.9189 и 0.8045 соответственно. С уменьшением коэффициента облучения, т.е. с ростом дозы облучения, прочность при растяжении, сопротивление изоляции и пробивное напряжение на постоянном токе возрастают до некоторого значения, после которого начинают уменьшаться; относительное удлинение при разрыве монотонно уменьшается.

Для механических характеристик корреляция выражена в большей степени, что также подтверждает

ется результатами рангового корреляционного анализа Спирмена: тест значимости для 100 % данных при p -уровне 0,001496. Для электрических характеристик тест значимости только для 25 % измеренных значений при p -уровне 0,617075.

Такое различие связано с объемом выборки измерений образцов для каждой дозы облучения: механические характеристики усреднены для 5-и измерений, электрические – для 1-го.

Между механическими и электрическими характеристиками существует также корреляционная связь (рис. 3).

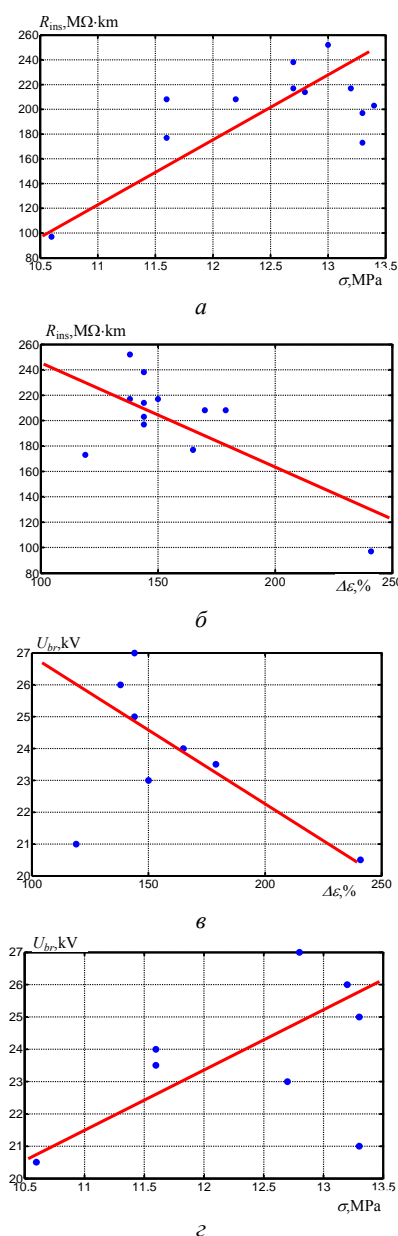


Рис. 3. Корреляционная зависимость между механическими и электрическими характеристиками радиационно-сшитой изоляции

Коэффициент корреляции между сопротивлением изоляции и прочностью при растяжении положительный и равен 0.6253 (рис. 3,а), между сопротивлением изоляции и относительным удлинением (рис. 3,б) – отрицательный и равен -0.7105 . Корреляция между пробивным напряжением и относительным

удлинением (рис. 3,в), между пробивным напряжением и прочностью при растяжении (рис. 3,г) – слабая: коэффициенты парной корреляции Пирсона равны -0.4980 и 0.4964 соответственно.

Учитывая, что стойкость к радиации материалов определяется радиационным индексом (RI) по [2] как десятичный логарифм поглощенной дозы в Грехах, при которой относительное удлинение снижается не более чем на 50 % (в два раза) относительно исходного значения, оптимальное значение коэффициента облучения лежит в диапазоне от 7 до 5. В этом диапазоне значений коэффициента облучения наблюдаются максимальные значения прочности при растяжении (см. рис. 2), сопротивления изоляции и пробивного напряжения на постоянном токе (см. рис. 3). Сопротивление изоляции возрастает более чем в два раза, пробивное напряжение на постоянном токе – в 1,3 раза относительно необлученного состояния, что связано с повышением однородности и упорядоченности молекулярной структуры полимера после сшивки. С уменьшением коэффициента облучения, т.е. увеличением дозы облучения, наблюдается тренд к снижению электрических характеристик вследствие накопления в полимере носителей заряда и свободных радикалов, образующихся в процессе облучения.

Выводы.

Исследовано влияние коэффициента облучения ускоренными электронами с энергией 0,5 МэВ на механические и электрические характеристики кабельной высоконаполненной антипиренными изоляции из безгалогенной композиции на основе сополимера этиленвинилацетата и установлена сильная корреляционная связь между относительным удлинением при разрыве и прочностью при растяжении, между сопротивлением изоляции и пробивным напряжением.

Впервые определен оптимальный диапазон коэффициента облучения изоляции кабелей, составляющий от 5 до 7, при обеспечении которого электрическое сопротивление изоляции возрастает более чем в два раза, пробивное напряжение на постоянном токе возрастает в 1,3 раза, а относительное удлинение при разрыве остается в пределах допустимых значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60092-359:2014. Electrical Installations In Ships – Part 359: Sheathing Materials For Shipboard Power And Telecommunication Cables By IEC TC/SC 18A. – 50 p.
2. Standard IEC 5444-4. Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials. Part 4: Classification system for service in radiation environments. – 1986. – 22 p.
3. Cleland M.R. High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing of Polymers // Hanser Publishers, Munich and Oxford University Press. – New York. – 1992. – 23 p.
4. Studer N. Electron beam crosslinking of insulated wire and cable: Process economics and comparison with other technologies // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry. – 1990. – vol.35. – no.4–6. – pp. 680–686. doi: 10.1016/1359-0197(90)90296-t.
5. Финкель Э.Э., Лещенко С.С., Брагинский Р.П. Радиационная химия и кабельная техника. – М.: Атомиздат, 1968, 313 с.
6. Machi S. Role of radiation processing for sustainable development // Emerging applications of radiation processing. – 2004, Vienna: IAEA. (IAEA-TECDOC-1386). – pp. 5-13.

7. Zimek Z., Przybytniak G., Nowicki A., Mirkowski K., Roman K. Optimization of electron beam crosslinking for cables // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2014. – vol.94. – pp. 161-165. doi: [10.1016/j.radphyschem.2013.07.005](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.07.005).
8. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Морозова Е.В. Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – №3. – С. 82-86. doi: [10.20998/2074-272X.2006.3.16](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2006.3.16).
9. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Морозова Е.В. Изменение механических свойств материалов конструктивных элементов оптических кабелей под действием радиации // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2004. – №7. – С. 28-35.
10. Беспрозванных А.В., Морозова Е.В., Соколенко А.Н. Влияние ионизирующего излучения на емкость и тангенс угла диэлектрических потерь сетевых кабелей // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2003. – вып.9. – т.4. – С. 3-8.
11. Berejka A.J. Radiation response of industrial materials: Dose-rate and morphology implications // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2007. – vol.261. – no.1-2. – pp. 86-89. doi: [10.1016/j.nimb.2007.03.097](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.03.097).
12. IEC 60811-2-1:2001. Common test methods for insulating and sheathing materials of electric and optical cables – Part 2-1: Methods specific to elastomeric compounds – Ozone resistance, hot set and mineral oil immersion tests. – 32 p.

REFERENCES

1. IEC 60092-359:2014. Electrical Installations In Ships – Part 359: Sheathing Materials For Shipboard Power And Telecommunication Cables By IEC TC/SC 18A. 50 p.
2. Standard IEC 5444-4. Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials. Part 4: Classification system for service in radiation environments. 1986. 22 p.
3. Cleland M.R. *High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing of Polymers*. Hanser Publ., Munich and Oxford University Press. New York, 1992. 23 p.
4. Studer N. Electron beam crosslinking of insulated wire and cable: Process economics and comparison with other technologies. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 1990, vol.35, no.4-6, pp. 680-686. doi: [10.1016/1359-0197\(90\)90296-t](https://doi.org/10.1016/1359-0197(90)90296-t).
5. Finkel E.E., Leschenko S.S., Braginsky R.P. *Radiatsionnaia khimiia i kabel'naia tekhnika* [Radiation chemistry and cable technology]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 313 p. (Rus).
6. Machi S. Role of radiation processing for sustainable development. *Emerging applications of radiation processing*, 2004, Vienna: IAEA. (IAEA-TECDOC-1386), pp. 5-13.
7. Zimek Z., Przybytniak G., Nowicki A., Mirkowski K., Roman K. Optimization of electron beam crosslinking for cables. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol.94, pp. 161-165. doi: [10.1016/j.radphyschem.2013.07.005](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.07.005).
8. Bezprozvannyh G.V., Naboka B.G., Morozova E.V. Radiating resistance of common commercial cables of internal laying. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.3, pp. 82-86. doi: [10.20998/2074-272X.2006.3.16](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2006.3.16). (Rus).
9. Bezprozvannyh G.V., Naboka B.G., Morozova E.V. Change in the mechanical properties of materials of structural elements of optical cables under the influence of radiation. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2004, no.7, pp. 28-35. (Rus).
10. Bezprozvannyh G.V., Morozova E.V., Sokolenko A.N. Effect of ionizing radiation on the capacitance and tangent of the dielectric loss angle of network cables. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2003, no.9, vol.4, pp. 3-8. (Rus).
11. Berejka A.J. Radiation response of industrial materials: Dose-rate and morphology implications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, vol.261, no.1-2, pp. 86-89. doi: [10.1016/j.nimb.2007.03.097](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.03.097).

12. IEC 60811-2-1:2001. Common test methods for insulating and sheathing materials of electric and optical cables – Part 2-1: Methods specific to elastomeric compounds – Ozone resistance, hot set and mineral oil immersion tests. – 32 p.

Поступила (received) 29.04.2018

Беспрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Мирчук Игорь Анатольевич², аспирант,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076010,
e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

²Приватное акционерное общество
«Украинский научно-исследовательский институт
кабельной промышленности»,
71101, Запорожская обл., Бердянск, ул. Промышленная, 2-Р,
тел/phone +38 066 8288554,
e-mail: garik710@ukr.net

G.V. Bezprozvannyh¹, I.A. Mirchuk²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Private Joint Stock Company «Ukraine Scientific-Research
Institute of Cable Industry»,
2-P, Promychnennaya Str., Berdyansk, Zaporozhye Region,
71101, Ukraine.

Correlation between electrical and mechanical characteristics of cables with radiation-modified insulation on the basis of a halogen-free polymer composition.

Introduction. The high saturation of the cable routes of nuclear and thermal stations, wind parks and solar power plants, on-board systems imposes stringent requirements in the field of fire safety of cables, which makes it necessary to use highly flame retardant halogen-free compositions. The introduction of flame retardants causes the mandatory modification (crosslinking) of the polymer matrix. **Purpose.** Determination of the optimal radiation dose based on the correlation between the mechanical and electrical characteristics of a radiation-modified halogen-free ethylene vinyl acetate copolymer with high-strength flame retardant insulation cables. **Methodology.** Mechanical and electrical tests of samples of radiation-modified cables with a copper conductor cross section of 1.0 mm² and a halogen-free filled insulation based on an EVA copolymer with a thickness of 0.7 mm have been performed. **Results.** A strong correlation is established between the elongation at break and the tensile strength, between the insulation resistance and the breakdown voltage. It is shown that at the optimum value of the irradiation coefficient in the range from 7 to 5, the insulation resistance increases more than twice, and the breakdown voltage at the direct current is increased by 1.3 times. The elongation at break is within the allowed values. References 12, figures 3.

Key words: halogen-free composition, radiation modification, irradiation coefficient, mechanical and electrical characteristics, correlation coefficient.