

**В.Н. Егоров**, канд. техн. наук, заместитель директора по науке Восточно-Сибирского филиала ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»;

**В.В. Костромин**, канд. техн. наук, главный специалист испытательного центра ОАО «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности»;

**В.Л. Масалов**, начальник отдела Восточно-Сибирского филиала ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»;

**Б.С. Романов**, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории ОАО «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности»

**Аннотация.** Исследованы зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 100 кГц двух марок полиэтилена и ряда фторопластов, а также их удельное объемное электрическое сопротивление в интервале поглощенных доз бета-излучения от  $10^2$  до  $5 \cdot 10^6$  Гр.

**Ключевые слова:** полиэтилен, фторопласты, диски, пленки, частота 100 кГц, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное объемное электрическое сопротивление, бета-излучение, дозовая зависимость.

**Abstract.** The dependences of relative dielectric constant and dielectric dissipation factor of two polyethylene grades and a number of fluoroelastomers at a frequency of 100 kHz and their specific volume resistance within the absorbed beta-radiation dose range from  $10^2$  to  $5 \cdot 10^6$  Gy were investigated.

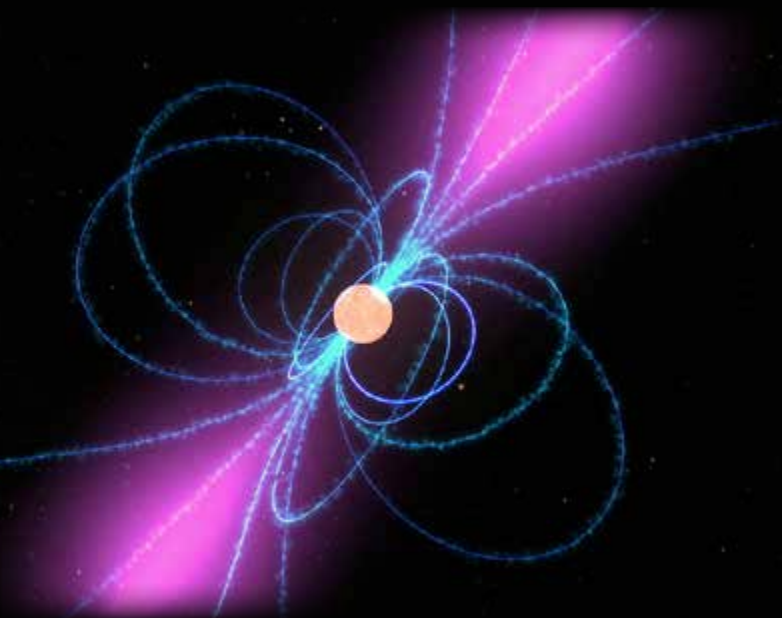
**Key words:** polyethylene, fluoroelastomers, discs, films, frequency of 100 kHz, dielectric constant, dielectric dissipation factor, specific volume resistance, beta-radiation, dose dependence.

Материал поступил в редакцию 22.05.2014  
Б.С. Романов E-mail: boris.romanov@okbkr.ru

Известно, что в качестве изоляции радиочастотных кабелей (РК) используют неполярные диэлектрики с малыми диэлектрическими потерями, такие как полиэтилен низкой плотности (ПЭ НП) и политетрафторэтилен (ПТФЭ) различных модификаций. РК широко используют в космических аппаратах, орбиты которых проходят через пояса радиации, и на АЭС в зонах с повышенным уровнем радиации. Поэтому важно знать закономерности изменения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) указанных полимеров в результате облучения. От величины  $\epsilon$  зависит волновое сопротивление РК, а изменение  $\text{tg}\delta$  приводит к изменению коэффициента затухания в кабеле.

Ранее была исследована зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  блочных образцов ПЭ НП и ПТФЭ на частоте 9,365 ГГц от дозы гамма-облучения [1]. В настоящей работе к измерениям  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  на пластинах и пленках добавлены измерения удельного объемного электрического сопротивления ( $\rho_v$ ).

Объектами исследования выбраны композиции кабельного ПЭ НП марок 153-01К и 153-02К, фторопласты Ф-4Д



## ВЛИЯНИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАБЕЛЬНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

марки Ш, Ф-4МБ марок Б и К (в виде дисков диаметром 50 мм, толщиной  $(1,0 \pm 0,2)$  мм). Для измерения  $\rho_v$  использовали диски диаметром 90 мм, изготовленные из этих же материалов. Кроме того, исследовалась ориентированная фторопластовая пленка марки Ф-4 ЭО толщиной 0,035 мм и 0,105 мм.

В проводимых ранее исследованиях диэлектрических характеристик полимерных материалов с низкими потерями использовали методы с погрешностью измерения  $\epsilon$  от 3 до 7 %, а  $\text{tg}\delta$  – от 30 до 50 % [2, 3]. В настоящей работе для измерения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  использована более точная измерительная аппаратура: измерительная ячейка ИЯ-2Т [4] (разработана в ВНИИФТРИ, г. Иркутск, диапазон частот 50 Гц–1 МГц) совместно с прецизионным измерителем LCR Agilent 4980 А. Реальные погрешности измерений не превышали 1 % для  $\epsilon$  и 15 % для  $\text{tg}\delta$ . Удельное объемное электрическое сопротивление  $\rho_v$  образцов измерено с помощью тераомметра ТОММ-01 и универсальной камеры ИК-01м [5] (ООО НПП «Норма», г. Самара). Ячейка ИЯ-2Т и камера ИК-01м позволяют проводить измерения на пленках толщиной от



а



б

 Рис. 1. Установки для измерения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  (а) и  $\rho_v$  (б) образцов диэлектриков

Таблица

**Исходные значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  образцов диэлектриков**

Материал		Толщина, мм	$\epsilon$	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$
Полиэтилен низкой плотности	ПЭ 153-01К	1,057	2,28	1,0
Полиэтилен низкой плотности	ПЭ 153-02К	1,130	2,33	1,0
Политетрафторэтилен	Ф-4Д марки Ш	1,034	2,01	0,2
Политетрафторэтилен (пленка ориентированная)	Ф-4 ЭО	0,035	2,03	1,0
		0,105	2,02	1,0
Сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом	Ф-4МБ марки Б	1,128	2,08	2,8
Сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом	Ф-4МБ марки К	1,188	2,10	3,0

0,03 мм и на пластинах толщиной до 3 мм. Относительная погрешность измерения  $\rho_v$  в интервале сопротивлений  $5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14}$  Ом по паспортным данным составляет  $\pm 10\%$  при измерительном напряжении 500 В.

Частота измерения 100 кГц выбрана из соображений более высокой точности измерений  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  в середине диапазона частот измерительной ячейки. Хотя частота 100 кГц далека от обычно используемых в космических аппаратах частот, но авторы исходили из того, что вид зависимостей диэлектрических характеристик  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  от дозы облучения для неполярных диэлектриков не должен сильно зависеть от частоты, на которой они измеряются. На рис. 1 показаны установки для проведения измерений  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $\rho_v$  образцов диэлектриков.

В таблице приведены значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  образцов, измеренные в исходном состоянии при нормальных условиях на частоте 100 кГц.

Образцы многократно облучали бета-излучением от источников БИС-20 с изотопами  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$  на бета-установке БОЭИ в воздушной среде при комнатной температуре. После облучения очередной дозой образцы выдерживали в нормальных условиях в течение не менее 16 часов и проводили измерения  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $\rho_v$ . Затем образцы облучали следующей дозой, значение которой суммировалось с суммой предыдущих доз. Бета-излучение изотопов  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$  представляет собой поток электронов широкого спектра с энергией от нескольких кэВ до 2,2 МэВ с максимумом около 0,9 МэВ. Длина пробега электронов с энергией 0,9 МэВ составляет 3,4 мм в полиэтилене и 1,4 мм во фторопластах. В области энергий более 0,9 МэВ спектр бета-излучения близок к спектру электронов в радиационных поясах Земли.

Мощность дозы бета-излучения в установке БОЭИ составляла 0,25 Гр/с. Калибровка мощности дозы на рабочем

столе установки проведена ФГУП ВНИИФТРИ (г. Москва) с помощью дозиметрических пленок СО ПД(Э)-5/50.

Последовательное наращивание дозы облучения небольшими порциями на одних и тех же образцах позволило получить подробную картину изменения  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $\rho_v$  исследованных образцов материалов вплоть до потери ими целостности.

**Результаты исследования  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$** 

Зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  ПЭ НП от дозы облучения приведены на рис. 2.

В пределах погрешности измерений кривые как  $\epsilon$ , так и  $\text{tg}\delta$  для обеих марок ПЭ НП совпадают, что вполне ожидаемо, так как они отличаются лишь типом вводимого при производстве термостабилизатора.

Максимальная суммарная доза облучения для ПЭ НП составила  $5 \cdot 10^6$  Гр, что соответствовало бы нахождению образцов на внешней поверхности космического аппарата на геостационарной орбите около 20 лет.

Оба образца полиэтилена до дозы  $1 \cdot 10^4$  Гр имеют значения  $\epsilon$  на уровне 2,33 – 2,35, а  $\text{tg}\delta$  находится в пределах  $(1-2) \cdot 10^{-4}$ . При дальнейшем облучении до дозы  $1 \cdot 10^5$  Гр наблюдается постепенное увеличение  $\epsilon$  до уровня 2,40, а  $\text{tg}\delta$  увеличивается до  $9 \cdot 10^{-4}$ .

Начиная с дозы  $3 \cdot 10^5$  Гр плавное увеличение  $\epsilon$  сменяется скачкообразным. Скачки выходят за рамки погрешности измерений. Что касается  $\text{tg}\delta$ , то он, начиная с дозы  $1 \cdot 10^5$  Гр и вплоть до максимальной дозы облучения  $5 \cdot 10^6$  Гр, монотонно увеличивается на порядок.

Известно [6], что при облучении в воздушной среде полиэтилена, содержащего стабилизаторы, происходят химические процессы сшивания и окисления макроцепей.

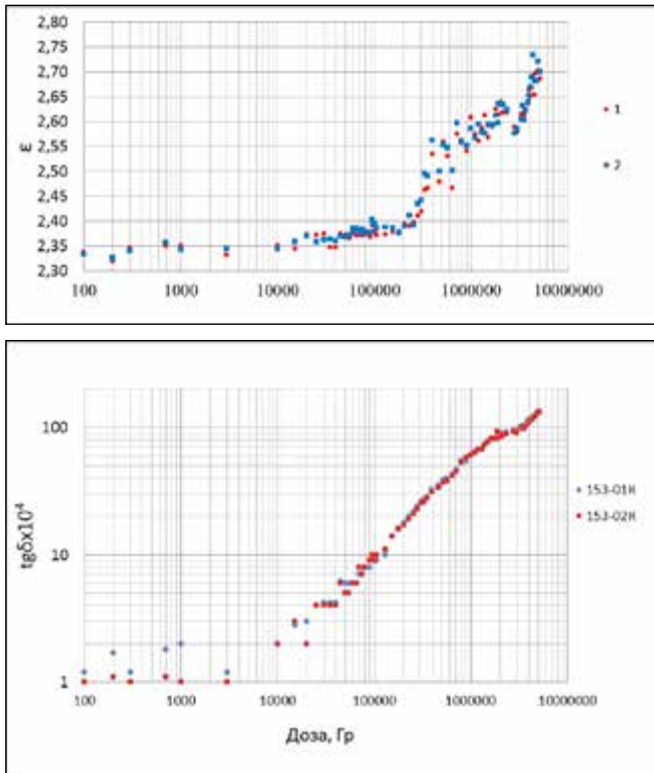


Рис. 2. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  ПЭ-153-01К (1) и ПЭ-153-02К (2) от дозы облучения

При этом полностью расходуется термостабилизатор, затем образуются различные кислородсодержащие группы и, наконец, транс-виниленовые ненасыщенности. Образование полярных кислородсодержащих групп вызывает рост  $\text{tg}\delta$ . Эти же процессы обуславливают внешние изменения образцов – потемнение и изменение цвета (с дозы  $2 \cdot 10^3$  Гр) вплоть до темнокоричневого, увеличение жесткости (с дозы  $4 \cdot 10^4$  Гр), коробление (с дозы  $5,2 \cdot 10^5$  Гр), появление поверхностных трещин по линиям внутренних напряжений (рис. 3), заложенных при прессовании пластин, из которых вырезались образцы (с дозы  $2,1 \cdot 10^6$  Гр). С появлением трещин наблюдается небольшой спад значений  $\epsilon$ .

Обращает на себя внимание значительный рост  $\text{tg}\delta$  ПЭ НП с  $1 \cdot 10^{-4}$  в исходном состоянии до  $9 \cdot 10^{-3}$  при дозе



Рис. 3. Поверхностные трещины по линиям внутренних напряжений на образце ПЭ НП 153-01К

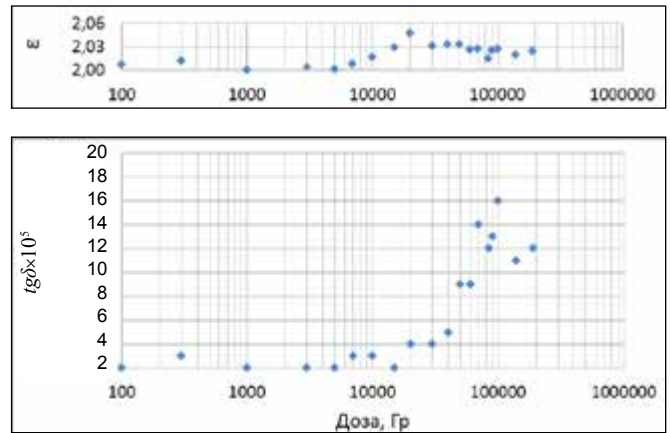


Рис. 4. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  фторопласта Ф-4Д Ш от дозы облучения

$2 \cdot 10^6$  Гр, то есть почти на 2 порядка. Ранее [1], для образца толщиной 12 мм из ПЭ НП 153-02К, зафиксировано при той же дозе  $2 \cdot 10^6$  Гр увеличение  $\text{tg}\delta$  на частоте 9,365 ГГц лишь в 2 раза. Такое расхождение связано с тем, что окисленный слой для образца толщиной 12 мм при мощности дозы 1 Гр/с составлял лишь 0,4 мм [1] с каждой стороны, то есть около 7 %, тогда как образец толщиной 1 мм был полностью окисленным с учетом в 4 раза меньшей мощности дозы у бета-установки (толщина окисленного слоя обратно пропорциональна квадратному корню из мощности дозы [7]).

На рис. 4–6 приведены зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  фторопластов от дозы облучения.

Из рис. 4 видно, что заметный рост значений  $\epsilon$  данного полимера начинается после дозы  $1 \cdot 10^4$  Гр и затем находится в пределах 2,02–2,05, а  $\text{tg}\delta$  начинает увеличиваться после дозы  $3 \cdot 10^4$  Гр. После облучения суммарной дозой  $1,9 \cdot 10^5$  Гр образец разрушился.

Пленки Ф-4 ЭО (рис. 5) в процессе облучения обнаруживают заметное снижение значений  $\epsilon$  с 2,04 до 1,92. Значения  $\text{tg}\delta$  остаются неизменными вплоть до полного разрушения образца. Механическая прочность пленки Ф-4 ЭО ограничивается дозами  $7 \cdot 10^4$  Гр при толщине образца 35 мкм и  $13 \cdot 10^5$  Гр при толщине 105 мкм. При дальнейшем облучении происходило разрушение образцов – расслаивание на полоски шириной 2–3 мм вдоль оси ориентации.

Отмечена очень высокая степень электризации образцов пленки Ф-4 ЭО в процессе облучения и проведения измерений  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  и  $\rho_v$ .

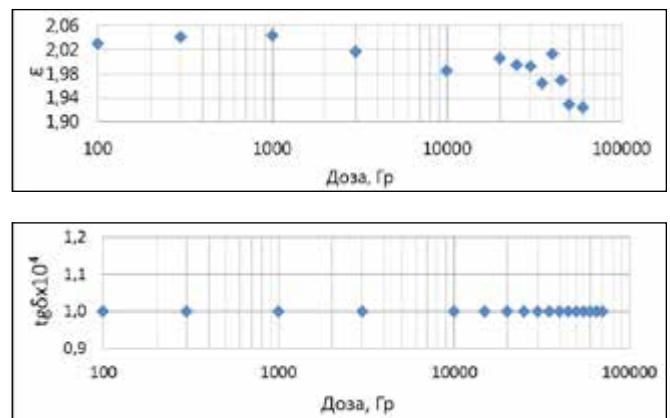


Рис. 5. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  пленки фторопласта Ф-4 ЭО толщиной 35 мкм от дозы облучения

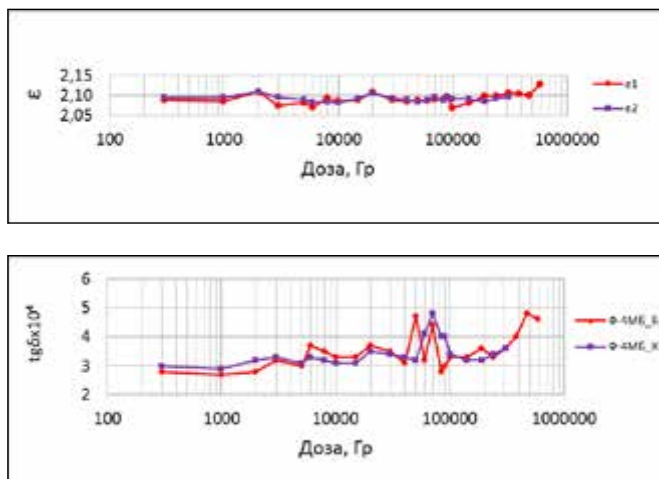


Рис. 6. Зависимость  $\epsilon$  и  $tg\delta$  Ф-4МБ марок Б и К от дозы облучения

Исследованные выше фторопласты являются модификациями политетрафторэтилена, который при облучении в присутствии кислорода претерпевает окислительную деструкцию [6]. При этом увеличивается плотность и образуются кислородсодержащие группы. Оба процесса вызывают увеличение  $\epsilon$  и  $tg\delta$ .

На рис. 6 приведены зависимости  $\epsilon$  и  $tg\delta$  фторопластов Ф-4МБ марок Б и К от дозы облучения.

Значения  $\epsilon$  образцов Ф-4МБ марок Б и К в пределах погрешности измерений остаются равными и практически постоянными на уровне 2,10 вплоть до полного разрушения образцов. В интервале доз  $(5-9) \cdot 10^4$  Гр значения  $tg\delta$  претерпевают два заметных скачка, природа которых не ясна. В интервале доз  $(1,0-1,4) \cdot 10^5$  Гр было отмечено выделение из образцов капель жидкости, вызвавшее коррозию стола из нержавеющей стали, на котором размещались образцы. Образцы стали жесткими.

По мере нарастания поглощенной дозы образцы теряли механическую устойчивость (разрушались без приложения механических усилий) в следующей последовательности: Ф-4 ЭО – после дозы  $(7-13) \cdot 10^4$  Гр, Ф-4Д марки Ш – после дозы  $1,9 \cdot 10^5$  Гр.

**Результаты исследования  $\rho_v$**

Известно [8], что ионизирующая радиация вызывает в полимерах как обратимые, так и необратимые изменения электропроводности, или обратной ей величины – объемного электрического сопротивления. Необратимое изменение

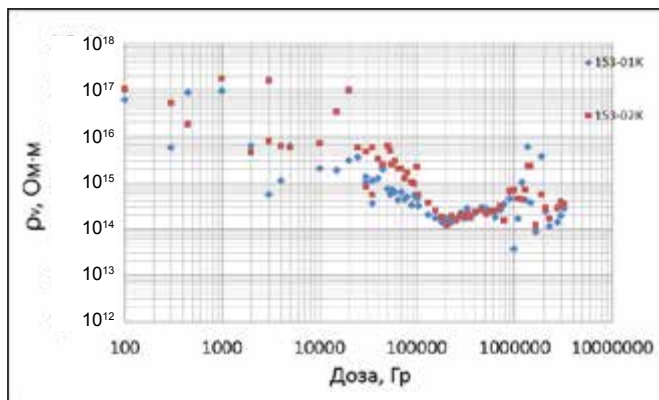


Рис. 7. Зависимость  $\rho_v$  ПЭ-153-01К и ПЭ-153-02К от дозы облучения

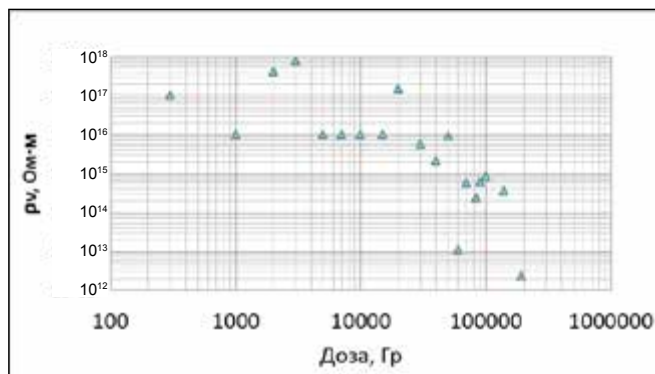


Рис. 8. Зависимость  $\rho_v$  Ф-4Д марки Ш от дозы облучения

удельного объемного электрического сопротивления  $\rho_v$  измеряли у всех перечисленных выше образцов.

На рис. 7 приведены зависимости  $\rho_v$  ПЭ-153-01К и ПЭ-153-02К от дозы облучения при нормальных условиях.

По мере накопления дозы облучения вплоть до суммарной дозы  $2,0 \cdot 10^5$  Гр разброс значений  $\rho_v$  существенно уменьшается и затем вновь постепенно нарастает. Вероятно, это вызвано появлением поверхностных трещин, которые развиваются до хорошо заметных концентрических трещин (появляются после дозы  $2,0 \cdot 10^5$  Гр).

Значения  $\rho_v$  фторопласта Ф-4Д марки Ш при увеличении дозы облучения монотонно уменьшаются до значения  $2 \cdot 10^{12}$  Ом·м при дозе  $2 \cdot 10^5$  Гр (рис. 8).

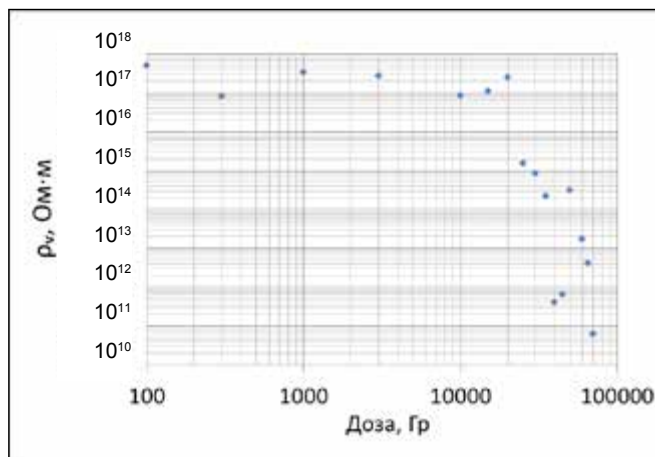


Рис. 9. Зависимость  $\rho_v$  пленки Ф-4 ЭО от дозы облучения

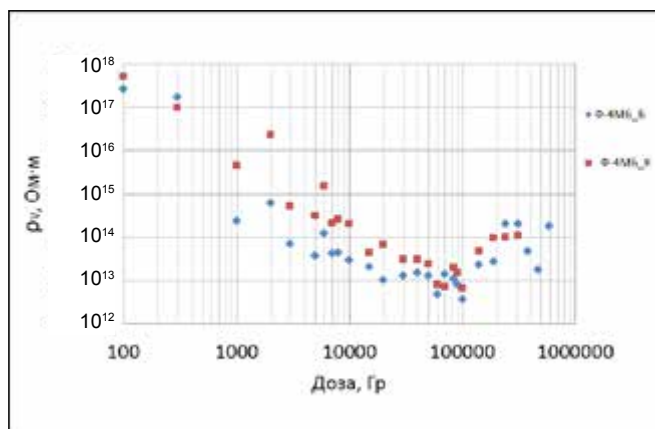


Рис. 10. Зависимость  $\rho_v$  фторопластов Ф-4МБ марок Б и К от дозы облучения

На рис. 9 представлена зависимость  $\rho_v$  пленки Ф-4 ЭО (0,035 мм). Значения  $\rho_v$  практически постоянны вплоть до дозы  $2 \cdot 10^4$  Гр, затем происходит снижение  $\rho_v$  на 6 порядков. Другой образец пленки Ф-4 ЭО (0,105 мм) разрушился после дозы  $1,2 \cdot 10^5$  Гр.

Значения  $\rho_v$  фторопластов Ф-4МБ марок Б и К монотонно уменьшаются на 5 порядков к дозе  $1 \cdot 10^5$  Гр, затем идет нарастание  $\rho_v$  вплоть до полного разрушения образца.

### Заключение

В результате проведенных исследований получены более полные и более точные данные о диэлектрических характеристиках и их зависимостях от дозы облучения бета-излучением для традиционных изоляционных материалов радиочастотных кабелей – за счет последовательного накопления дозы облучения небольшими порциями на одних и тех же образцах и использования современной измерительной аппаратуры.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Романов Б.С., Костромин В.В., Егоров В.Н., Попов М.Ф. Влияние ионизирующего излучения на диэлектрические свойства полиэтилена и фторопласта на СВЧ // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». – 2006. – Вып. 1–2. – С. 87–90.
2. Насонов В.С., Кокшаров А.М., Коган А.А. Диэлектрические потери в материалах на высоких частотах при температуре жидкого гелия // Пластические массы. – 1971. – № 8. – С. 34.
3. Милинчук В.К., Туликов В.И., Брискман Б.А. и др. Радиационная стойкость органических материалов: справочник / Под ред. В.К. Милинчука и В.И. Туликова – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц. Методика измерений. – Иркутск: Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», 2011.
5. Тераомметр ТОММ-01. Руководство по эксплуатации, РЭ 4221-001-11034781-2003. – Самара: ООО «НПП «НОРМА».
6. Махлис Ф.А. Радиационная физика полимеров. – М.: Атомиздат, 1972.
7. Скурда В.Д., Белоусова М.В., Маклаков А.И. Изучение особенностей радиационно-окислительных процессов в поверхностных слоях полиэтилена низкой плотности методом ЯМР // Высокомолекулярные соединения. – 1984. – Т. 26, № 10. – С. 765.
8. Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С. Электрические свойства полимеров / Под ред. Б.И. Сажина. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1986.

### НОВЫЕ НАЗНАЧЕНИЯ

## ГРУППА КОМПАНИЙ



«Севкабель»

## ВОЗНЕСЕНСКИЙ Александр Эрнестович

Решением Совета директоров генеральным директором группы компаний «Севкабель» назначен Александр Эрнестович Вознесенский.

А.Э. Вознесенский родился 8 апреля 1972 г. в Ленинграде. В 1998 г. окончил Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов. Кандидат экономических наук. В 2004 г. получил степень МВА («Мастер делового администрирования») в Высшей школе менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета. С 1998 по 2004 гг. А.Э. Вознесенский преподавал на кафедре финансов Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов. С 2000 по 2001 гг. он работал в администрации Санкт-Петербурга начальником управления тарифной политики и ценообразования Комитета экономики и промышленной политики. В 2004 г. пришел на работу в ОАО «Климов» на должность заместителя генерального директора по экономике и финансам; в 2007 г. стал директором по стратегическому развитию и корпоративным вопросам, а с 2013 г. по настоящее время – советник исполнительного директора этой компании. В 2010–2011 гг. он являлся директором ООО «Управляющая компания по строительству Ново-Адмиралтейской верфи». С 2011 по 2013 гг. был генеральным директором ООО «Балтийский завод-судостроение».