

УДК 620.168.373

Е.В. Быков, А.И. Дёмко, С.А. Радомский, Н.В. Семерухина

Результаты исследования электрического сопротивления антистатических трубок

Рассмотрены проблемы, связанные с определением удельного электрического сопротивления графитонаполненных фторполимерных трубок, применяемых в датчиках уровня. Приведены результаты серии экспериментальных измерений, проведена их статистическая обработка и обоснована функция распределения удельного сопротивления.

Ключевые слова: антистатические трубки, удельное сопротивление, функция распределения.

Калиброванные трубки из антистатических наполненных фторполимеров нашли свое применение в датчиках уровня, предназначенных для использования во взрывоопасных объектах (например, в нефтехранилищах, автозаправочных станциях) [1]. Для этих изделий одним из основных нормируемых параметров является уровень их электропроводности, способный обеспечить стекание статического заряда и предотвратить искрообразование. С 2010 г. ЗАО «Электроннефтемаш» производит антистатические трубки из графитонаполненного фторполимера (Teflon PFA C-980) производства фирмы Du Pont. В сертификате на антистатическое сырьё указывается удельное сопротивление, измеренное на образце в виде плоской прессованной пластины. При сертификации изделий из такого сырья прилагается, как правило, сертификат на исходный антистатический материал, однако это не гарантирует того, что детали, выполненные из данного материала, будут иметь такие же значения удельного сопротивления и в той же мере обладать антистатическими свойствами. В статье приведены (насколько нам известно впервые) результаты исследования удельного электрического сопротивления трубок из антистатического материала, подтверждающие возможность использования таких трубок в изделиях, предназначенных для применения в пожаро- и взрывоопасных средах.

В процессе производства антистатических трубок было обнаружено систематическое превышение результатов измерений удельного сопротивления трубок нормы, указанной в спецификации на исходный материал (0,25 Ом·м). Необходимо было выяснить, чем определяется такое расхождение: методикой измерения или параметрами материала.

Первоначально измерения электрического сопротивления трубок проводились на коротких образцах длиной 200 мм. При этом выяснилось, что контактные сопротивления (в области прикрепления электродов) заметно влияют на конечный результат измерений. Для исключения влияния контактных сопротивлений и увеличения точности измерений сопротивления была предложена описанная ниже методика.

Сопротивление образца трубки может быть представлено в виде суммы следующих составляющих:

$$R = R_{\text{конт}} + R_{\text{труб}} + R_{\text{конт}} = 2R_{\text{конт}} + R_{\text{труб}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{конт}}$ – переходное сопротивление контакта, выполненного в виде хомута; $R_{\text{труб}}$ – собственное сопротивление образца трубки, которое определяется размерами и удельным сопротивлением:

$$R_{\text{труб}} = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление трубки; l – длина образца трубки; S – площадь поперечного сечения трубки,

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d-2\Delta}{2}\right)^2 = \pi \cdot \Delta \cdot (d - \Delta),$$

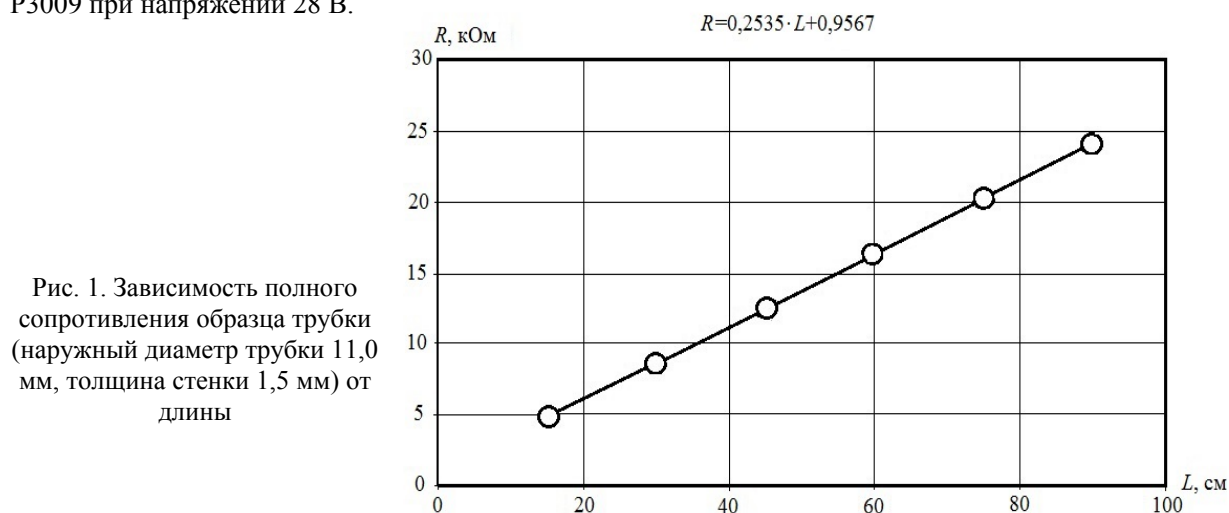
Δ – толщина стенки трубки; d – внешний диаметр трубки.

При подстановке (2) в исходное соотношение (1) получается линейная зависимость общего сопротивления от длины образца.

$$R = 2R_{\text{конт}} + \rho \cdot \frac{l}{S} = 2R_{\text{конт}} + l \cdot \frac{\rho}{S}. \quad (3)$$

Зависимость сопротивления R от длины имеет наклон $\frac{\rho}{S}$, значение которого и является иско-
мой величиной, а свободный член $2R_{\text{конт}}$ характеризует контактное сопротивление, которое являет-
ся источником дополнительной ошибки измерения.

Зная геометрию трубки и определив наклон зависимости (3), можно вычислить значение удель-
ного сопротивления ρ , свободное от влияния контактных сопротивлений. На рис. 1 приведен при-
мер зависимости полного сопротивления от длины для трубки с наружным диаметром 11,0 мм и
толщиной стенки 1,5 мм. Измерения проводились с использованием моста постоянного тока типа
P3009 при напряжении 28 В.



Предложенная методика измерений позволяет избежать наложения дополнительных специаль-
ных требований к контактам для уменьшения их сопротивления, т.к. значение контактного сопро-
тивления не входит в конечный результат измерений. Незначительное увеличение случайной по-
грешности измерения, вносимой контактными сопротивлениями, можно уменьшить за счет
увеличения числа точек измерения (из статистики известно, что погрешность убывает пропорцио-
нально квадратному корню из числа измерений).

Таким образом, предложенная методика позволила исключить влияние систематической по-
грешности в виде контактного сопротивления на конечный результат измерений удельного сопро-
тивления. Это обстоятельство дало основание полагать, что расхождение результатов измерений
удельного сопротивления, полученного на трубках, с нормой, указанной для исходного материала,
определяется поведением самого материала и не связано с методикой измерения.

Во-первых, сам производитель материала (фирма Du Pont) в спецификации указывает на то, что
результаты измерений удельного материала зависят от способа приготовления образцов. На наш
взгляд, это важное замечание, и связано оно с хорошо известным фактом [2, 3] о том, что техно-
логическая предыстория образца (условия кристаллизации) сильно влияет на формирование надмоле-
кулярной структуры кристаллизующихся полимеров, которая в свою очередь будет влиять на объ-
емное распределение наполнителя в полимерной матрице. В этой связи отметим, что нормы для
удельного сопротивления, приводимые в спецификации на материал, получены на образцах в виде
прессованных пластин. В рассматриваемом случае использовались изделия в виде трубок, получен-
ных методом экструзии.

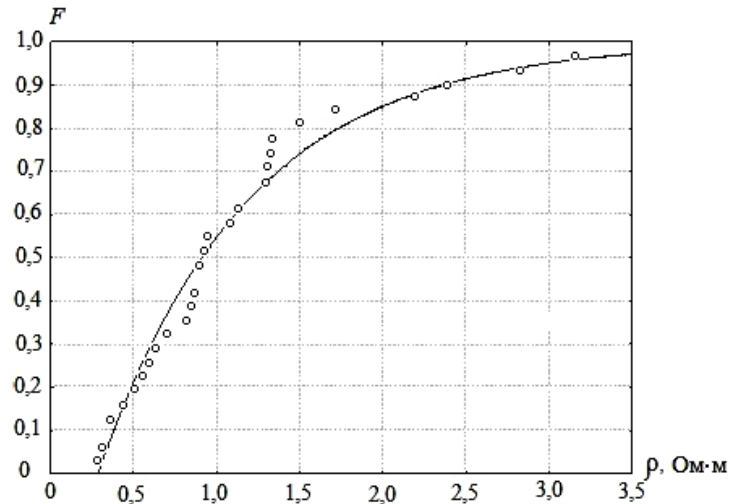
Сказанное становится почти очевидным, если обратиться к работам [4, 5], посвященным изуче-
нию электропроводности случайных сеток. Здесь, как и в случае наполненных полимеров, проводи-
мость обеспечивается электропроводящими мостиками, топология которых формируется случай-
ным образом. Кроме этого, следует учесть наличие случайных вариаций концентрации наполнителя
от партии к партии в исходном материале. Все это приводит к мысли о необходимости применения
статистического подхода для анализа наблюдаемых вариаций значений удельного сопротивления,
полученных при измерениях трубок различных размеров (с наружным диаметром от 8,0 до 15,5 мм

и толщиной стенки от 0,5 до 1,5 мм), изготовленных из различных партий материала на протяжении продолжительного времени.

Анализ статистических данных (30 измерений трубок разных партий) удельного электрического сопротивления трубок показал, что эти значения хорошо описываются экспоненциальным распределением со смещенным началом координат:

$$F = 1 - \exp(-\lambda \cdot (\rho - \rho_0)) \quad (4)$$

и параметрами $\lambda = 1,11 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\rho_0 = 0,289 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.



Экспериментальные данные и аппроксимирующий график представлены на рис. 2, откуда следует достаточно близкое соответствие эксперимента и аппроксимации (коэффициент детерминации 0,9951).

Рис. 2. Интегральная функция (точки – экспериментальные данные) распределения удельного сопротивления

Для большей наглядности того, насколько адекватна данная аппроксимация, на рис. 3 приведен график интегральной функции распределения удельного сопротивления в полулогарифмических координатах:

$$-\ln(1-F) = \lambda \cdot (\rho - \rho_0), \quad (5)$$

в которых экспериментальные данные ложатся на прямую линию (коэффициент детерминации 0,9785).

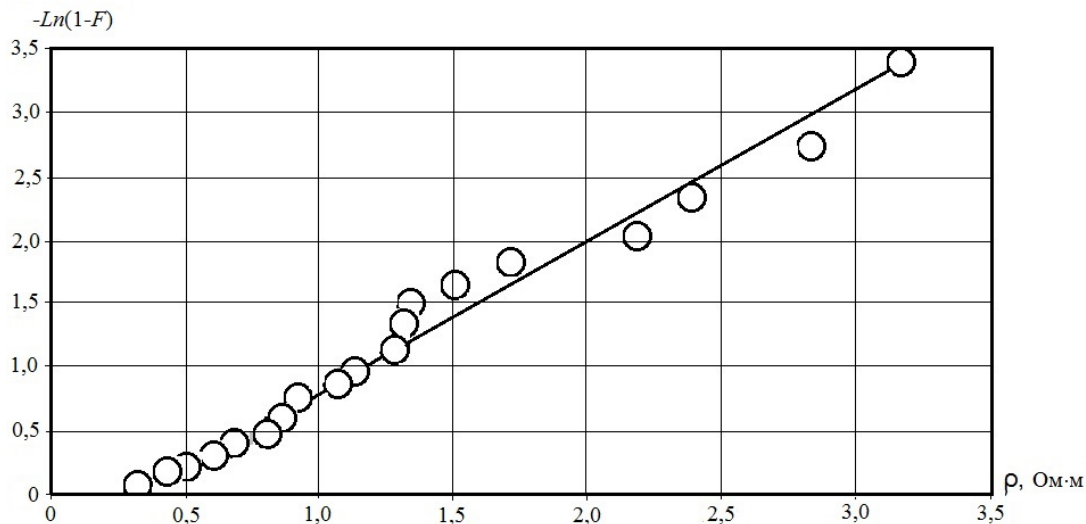


Рис. 3. Логарифм интегральной функции распределения удельного сопротивления

На рис. 4 приведена гистограмма распределения удельного сопротивления образцов трубки с внешним диаметром 13 мм. Из рис. 3 следует, что наиболее вероятные значения удельного сопротивления находятся в интервале от 0,4 до 1,0 Ом·м.

Итак, полученные результаты измерений электропроводности трубок из графитонаполненного фторполимера позволяют сделать следующие выводы:

1. Нормирование удельного электрического сопротивления для изделий в виде трубок целесообразно формулировать в вероятностных терминах. В частности, полученные результаты позволяют констатировать, что для исследованных образцов в 95% случаев удельное сопротивление трубок не превышает значения 2,8 Ом·м.

2. Все результаты измерений удельного электрического сопротивления, проводимые на трубках, оказались выше верхнего предела 0,25 Ом·м, указанного в спецификации на материал. В то же время нижний предел распределения ($\rho_0 = 0,289$ Ом·м) близок к указанной норме.

3. Результаты исследования удельного электрического сопротивления трубок из антистатического материала подтверждают возможность использования таких трубок в изделиях, предназначенных для применения в пожаро- и взрывоопасных средах.

4. Результаты исследования показывают влияние технологической предыстории изделия на его удельное сопротивление.

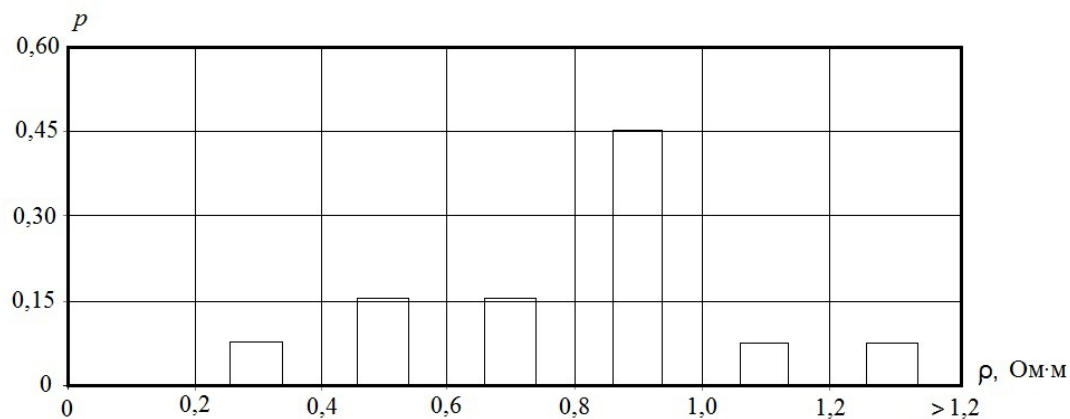


Рис. 4. Гистограмма удельного сопротивления образцов трубки с внешним диаметром 13 мм

Статья печатается в рамках проведения конкурса 2014 г. на соискание премии Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на выполнение научно-исследовательских работ, имеющих фундаментальное и прикладное значение.

Литература

1. Пат. №134317 РФ, МПК G01F 23/28. Магнитострикционный уровнемер / А.И. Дёмко (РФ), С.А. Радомский (РФ). – №2013119114; заявл. 24.04.13; опубл. 10.11.13, Бюл. № 31.– 2 с.
2. Вундерлих Б. Физика макромолекул. Зарождение, рост и отжиг кристаллов. – М.: Мир, 1979. – Т. 2. – 574 с.
3. Вундерлих Б. Физика макромолекул. Плавление кристаллов. – М.: Мир, 1984. – Т. 3. – 488 с.
4. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. – М.: Мир, 1982. – 175 с.
5. Займан Д. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем. – М.: Мир, 1982. – 592 с.

Быков Евгений Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, технический директор ЗАО «Электроннефтемаш», Москва
Тел.: +7 (495) 956-68-18, моб.: +7-916-480-38-47
Эл. почта: e.v.bykov@yandex.ru

Дёмко Анатолий Ильич

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и энергетики Политехнического института Сургутского государственного университета, директор ООО «Малое инновационное предприятие «Беспроводные и измерительные технологии» (ООО «БИТ»), Сургут
Тел.: +7 (346-2) 76-31-24, моб.: +7-922-440-24-88
Эл. почта: dai321@mail.ru

Радомский Сергей Анатольевич

Главный инженер ООО «Средства автоматизации Радомского и компании» (ООО «САРиК»), Сургут
Тел.: +7 (346-2) 22-31-02, моб.: +7-922-253-40-15
Эл. почта: radomsky.s@yandex.ru

Семерухина Надежда Владимировна

Инженер ЗАО «Электроннефтемаш», Москва

Тел.: +7 (495) 956-68-18

Эл. почта: e.v.bykov@yandex.ru

Bykov E.V., Dyomko A.I., Radomski S.A., Semerukhina N.V.

The research results of electrical resistivity of antistatic tubes

The paper investigates the problems of determining the electrical resistivity of graphite-filled fluoropolymer tubes used in level sensors. The results of a series of experimental measurements are given, their statistical processing is carried out and the distribution function of resistivity is proved.

Keywords: anti-static tube, the resistivity distribution function.
