

3. Дубровский Е.Ю., Добышев Е.В., Климкин О.А. «Проектирование единой трехмерной сети электрических интерфейсов космического аппарата с применением интегрированной системы SEE Electrical PLM», доклад из сборника научных трудов II всероссийского форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ». Томск. 2014. – С. 247–250.

4. Интегрированная система проектирования и испытаний единой трехмерной сети электрических интерфейсов космических аппаратов. Подсистема ведения конструкторских работ. КРИС БКС. Руководство оператора ПО SEE Electrical PLM 643.59502470.00008-01 34 09, Санкт-Петербург, 2013. – 83 с.

Дубровский Е.Ю., Добышев Е.В. «Проектирование бортовой кабельной сети космического аппарата с применением систем проектирования САТИА V5R19 и SEE Electrical PLM», доклад из сборника XIX научно-технической конференции «ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА». Томск. 2015 – С. 240–242.

## **ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДО ПРОБОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

*В.И. Меркулов, А.П. Леонов, В.А. Болгова*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

Известно [1, 2], что при проектировании электроизоляционных конструкций большое значение имеет оценка времени до пробоя полимерной изоляции, применяемой в этих конструкциях. На время до пробоя оказывают значительное влияние степень однородности электрического поля, определяемая особенностями самой конструкции, температура окружающей среды, наличие механической нагрузки и другие факторы.

В работах [3-5] показано, что для объяснения закономерностей разрушения полимерных материалов под действием различных нагрузок может быть использована термофлуктуационная теория, разработанная академиком С.Н. Журковым в 1967 г. [6].

Согласно кинетической термофлуктуационной теории С.Н. Журкова, разрушение материала происходит из-за разрыва химических связей, который вызывается совместным действием энергии теплового движения молекул и какой-то внешней силы (механической нагрузки, напряженности электрического поля и др.). Непосредственно разрыв химической связи, ослабленной действием внешних нагрузок, происходит благодаря флуктуации кинетической энергии теплового колебательного движения атомов или молекул.

На возможность использования термофлуктуационной теории С.Н. Журкова для оценки времени до пробоя полимерных диэлектриков указывается

в работах [7-10]. В [11], опираясь на термофлуктуационную теорию, В.С. Дмитриевским было получено уравнение кривой жизни применительно к полимерным диэлектрикам:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{D \cdot \phi(x)}{2KT}}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – постоянная времени;

$D$  – энергия разрыва химической связи;

$\phi(x)$  – функция от действующих нагрузок ( $x$ ), вызывающих уменьшение потенциального барьера:

$$\phi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln \left[ \frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right], \quad (2)$$

$$x = \frac{1}{D} \sqrt{(Ae^{-bT} \beta \eta E)^2 + (\gamma \sigma)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $A, \gamma, b$  – параметры уравнения, требующие предварительного определения;

$\eta$  – коэффициент, учитывающей повышение напряженности электрического поля за счет формы электродов;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий повышение напряженности электрического поля за счет неоднородности структуры материала диэлектрика;

$\sigma$  – механическая нагрузка, [Н/м];

$E$  – напряженность приложенного электрического поля, [В/м];

$\nu$  – коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости материала с температурой.

Определение параметров, входящих в уравнение (1), производилось на основе методики, описанной в [12]. Для определения параметров уравнения кривой жизни испытывались две партии по 30 образцов, изготовленных методом скрутки в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60851-5-2008 из провода с изоляцией из блок сополимера этилена с пропиленом. Испытания проводились при температурах 130 °С и 140 °С и напряжении 7 кВ, что соответствовало напряженности электрического поля  $1.9 \cdot 10^7$  В/м, определенной с помощью программы *Elcut* [13]. Согласно [12], были рассчитаны параметры:  $A = 2.92 \cdot 10^{-26}$  [Дж·м/В];  $b = 9.4 \cdot 10^{-3}$ , 1/К;  $\beta = 2.39$ . Коэффициент  $\eta$  прием равным  $\eta = 1.0$ , т.к. неоднородность электродной системы уже учтена при расчете напряженности поля по программе *Elcut*. Поскольку при изготовлении образцов скруткой возникающие в них механические напряжения незначительны, то ими можно пренебречь, т.е. принять, что  $(\gamma \sigma = 0)$ . Значение энергия разрыва химической связи  $D$  принималось равным  $5.5 \cdot 10^{-19}$  Дж/св для наиболее слабой химической связи -C-C-.

Значения функции  $\phi(x) = 0.381$  и постоянной  $\tau_0 = 6.774 \cdot 10^{-4}$ , с, были определены на основе результатов испытания проводов при температурах 130 °С и 140 °С и напряжении 7 кВ.

На основе найденных параметров согласно уравнения (1) были рассчитаны значения времени до пробоя  $\tau_{np}$  при различных температурах с помощью прикладной программы *Mathcad*. Для оценки степени различия расчетных и экспериментальных значений времени до пробоя проводились дополнительно испытания при температурах 60 °С и 80 °С. Результаты расчета и данные эксперимента показаны в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета времени до пробоя и экспериментальные результаты

Приложенное напряжение $U=7$ кВ			
Температура, К	Температура, °С	Расчетное значение времени до пробоя $\tau_{np}$ , с	Экспериментальное значение среднего времени до пробоя $\tau_{ср.пр}$ , с
333	60	$5.398 \cdot 10^6$	$5.40 \cdot 10^6$
343	70	$2.777 \cdot 10^6$	-
353	80	$1.483 \cdot 10^6$	$1.50 \cdot 10^6$
363	90	$8.203 \cdot 10^5$	-
373	100	$4.682 \cdot 10^5$	-

Продолжение таблицы 1

383	110	$2.752 \cdot 10^5$	-
393	120	$1.662 \cdot 10^5$	-
403	130	$1.029 \cdot 10^5$	$1.029 \cdot 10^5$
413	140	$6.521 \cdot 10^4$	$6.521 \cdot 10^4$

Для наглядного отображения полученных результатов построен график зависимости времени до пробоя от температуры при напряженности электрического поля  $E = 1.9 \cdot 10^7$  В/м.

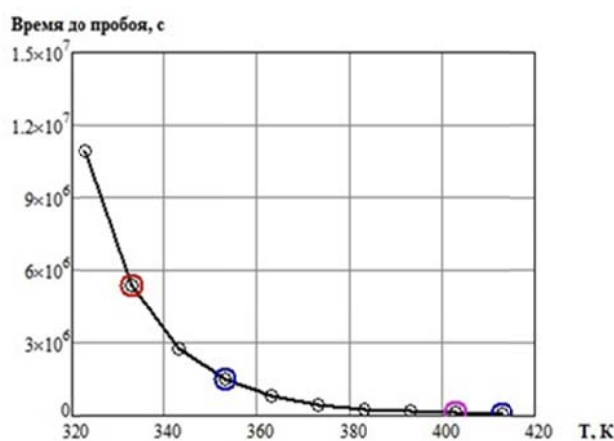


Рис. 1. График зависимости времени до пробоя от температуры

Приведенный на рис. 1 график показывает, что расчетные зависимости времени до пробоя, полученные на основе термофлуктуационной теории, хорошо согласуются с экспериментальными результатами (расхождение не превышает 3%), что позволяет прогнозировать время развития пробоя диэлектриков с учетом воздействия различных факторов.

## Выводы

1. В данной работе показано, что для расчета времени до пробоя полимерных диэлектриков может быть использована математическая модель на основе термофлуктуационной теории разрушения.

2. При определении параметров уравнения кривой жизни по данным эксперимента необходимо учитывать статистический характер воздействующих нагрузок и определяемых параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность электрических деталей. – М.-Л.: Энергия, 1968. – 287 с.
2. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г. С. Кучинский. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
3. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
4. Цой Б. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.
5. Kausch Н.К. Polymer fracture // Перевод на русский. – М.: Изд-во Мир, 1981.
6. Журков С.Н. Проблема прочности твёрдых тел. – Вестник АН СССР, 1957. № 11, с. 78-82.
7. Слуцкер А.И., Поликарпов Ю.И., Гиляров В.Л. Об элементарных актах и кинетике электрического разрушения полимеров. // ЖТФ. – 2006. – Т. 2006, вып. 12. – С. 52-56.
8. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
9. Цой Б. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.
10. Дмитриевский В.С. Вывод уравнения надежности электрической изоляции. // Электротехника. 1973, №3. – С. 56–58.
11. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. - М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
12. Определение параметров уравнения кривой жизни на основе термофлуктуационной теории [Электронный ресурс] / В. И. Меркулов, А. П. Леонов, К. П. Арефьев // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3-6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ ; под ред. А. Н. Дьяченко [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – [С. 114-115]. Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/090.pdf>
13. ELCUT® Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. Руководство пользователя. Производственный кооператив ТОР, г. Санкт-Петербург, СПб.: НПКС «ТОР», 2010. – 212 с. URL: <http://www.elcut.ru> (дата обращения: 20.03.2015).