

4. В. А. Каргин, Т. И. Соголова, В. М. Рубштейн. Высокомолек. соед., А10, 2017, 1968.
5. В. И. Бирюзова, В. Л. Боровягин, В. П. Гилев, Н. А. Киселев, А. С. Тихоненко, Ю. С. Ченцов. Электронно-микроскопические методы исследования биологических объектов, Изд-во АН СССР, 1963.
6. В. А. Каргин, И. И. Горина, Докл. АН СССР, 165, 1105, 1965.
7. В. А. Каргин, И. И. Горина, Высокомолек. соед., 7, 220, 1965.

УДК 621.315.616.9;621.311.1.015.3

## О ВНУТРЕННЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКИ

*В. Т. Ренне, И. Д. Форсилова*

В последние годы получили широкое применение пленочные полимерные электроизоляционные материалы [1]. Для конденсаторостроения величина электрической прочности полимерных пленок  $E_{\text{пр}}$  имеет важное значение, однако ее экспериментальное определение наталкивается на ряд трудностей (дефекты поверхности и искажения структуры в прилегающих к поверхности слоях пленок, влияние толщины образца, площади электродов, частоты электрического поля и других факторов) [2]. Поэтому для сравнительной оценки полимерных пленок из различных материалов основополагающее значение имеет величина внутренней электрической прочности  $E_{\text{пр.vn}}$ .

**Аналитическое определение  $E_{\text{пр.vn}}$ .** Один из возможных аналитических методов определения внутренней электрической прочности базируется на модели образования в пленке канала, заполненного ионизированными атомами вещества. Напряженность поля  $E_{\text{пр.vn}}$  при внутреннем пробое материала должна быть связана с энергией, затрачиваемой на образование этого канала пробоя. Можно сделать допущение о том, что условием развития пробоя является выделение энергии, которая расходуется: а) на диссоциацию одного звена макромолекулы  $W_D$ ; б) на ионизацию диссоциированных атомов  $W_U$ ; в) на взаимное отталкивание частиц  $W_B$ .

Определим эту энергию применительно к полипропилену.

а. Энергия диссоциации звена макромолекулы  $W_D = \sum_i^n n_i D_i$ , где  $D_i$  — энергия диссоциации  $i$ -ой связи,  $n_i$  — число таких связей. Обращаясь к формуле звена макромолекулы полипропилена  $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ -\text{C}-\text{CH}_2- \\ | \\ \text{H} \end{array}$ ,

расчленим возможный процесс диссоциации на ряд последовательных этапов, используя для оценки энергии диссоциации каждой связи известные [3] данные (табл. 1). Общая энергия диссоциации  $W_D = 825$  ккал/моль.

Таблица 1

### Энергия диссоциации звена молекул полипропилена

Параметр	Вид связи				Общая энергия, ккал/моль
	СН <sub>3</sub> — Н	СН — Н	С — Н	С — С	
Число связей $n_i$	1	2	3	3	—
Энергия $D_i$ , ккал/моль	85	128	81	80,5	—
$n_i D_i$ , ккал/моль	85	256	243	241,5	825

б. Энергия ионизации атомов водорода в звене  $W_U^{(H)} = m_H W_H$ , а углерода  $W_U^{(C)} = m_C W_C$ , где  $W_H$  и  $W_C$  — энергия ионизации одного атома водорода и углерода ( $W_H = 312,2$ ,  $W_C = 260$  ккал/моль),  $m_H$  и  $m_C$  — число этих атомов в звене. Прежде всего начнется ионизация атомов с наименьшим значением энергии ионизации, в данном случае атомов углерода. Тогда  $W_U = W_U^{(C)} = 3 \cdot 260 = 720$  ккал/моль. Сравнивая значения энергии диссоциации  $D_i$  и энергии ионизации  $W_C$ , замечаем, что  $D_i < W_C$ ; например, наибольшее значение  $D_i$  для связи (CH—H) составляет 128 ккал/моль (табл. 1), а энергия ионизации  $W_C = 260$  ккал/моль. Это свидетельствует о справедливости принятой последовательности процесса каналообразования.

в. Потенциальная энергия взаимного отталкивания значительно меньше, чем энергия диссоциации и ионизации. По аналогии со щелочно-галоидными соединениями допускаем  $W_B = 0,08$  ( $W_D + W_U$ ) =  $= 0,08 \cdot (825 + 720) = 128$  ккал/моль.

Общая энергия, затрачиваемая на образование канала пробоя  $A_c^0 = \frac{\gamma}{M} (W_D + W_U + W_B)$ , ккал/см<sup>3</sup>, где  $M$  = молекулярный вес звена полимера,  $\gamma$  — его плотность; для полипропилена  $A_c^0 = \frac{0,92}{42} \cdot (825 + 720 + 128) = 36,65$  ккал/см<sup>3</sup>.

Переходя к вычислению  $E_{\text{пр.вн}}$ , заметим, что процесс электрического разрушения полимеров подчиняется статистической закономерности (обычно нормальное распределение), для установления которой необходима большая партия  $N$  одинаковых образцов. Стандартное отклонение  $\sigma$  от сред-

него значения  $\bar{E}_{\text{пр}}$  электрической прочности  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (E_{\text{пр}} - \bar{E}_{\text{пр}})^2}$  используется для оценки с помощью табулярной функции Лапласа  $\Phi\left(\frac{p}{\sigma \sqrt{2}}\right)$  доверительного интервала значений пробивной напряженности поля:  $E_{\text{пр}} \pm p$ , где  $p$  — выбирают равным (1...3) $\sigma$  ( $p$  — вероятность пробоя диэлектрика при данной напряженности поля). Так, при  $p = \sigma$  функция  $\Phi\left(\frac{\sigma}{\sigma \sqrt{2}}\right) = 0,68$ ; это означает, что в интервале значений от  $(E_{\text{пр}} - \sigma)$  до  $(E_{\text{пр}} + \sigma)$  будет пробито около 70% всех образцов [4].

Анализ теоретических и экспериментальных данных для ряда полимеров показывает [5], что зависимость  $E_{\text{пр.вн}}$  от энергии каналообразования  $A_c^0$  выражается формулой  $E_{\text{пр.вн}} = 16 (3 + 4\Phi) (A_c^0)^{1,1}$  кв/см, где  $\Phi$  — указанная функция, определяющая доверительный интервал. Этой зависимости удовлетворяют значения  $E_{\text{пр.вн}}$ , например для полистирола, полизтилена, политетрафторэтилена и поливинилхлорида при температурах ниже температуры стеклования.

Внутренняя электрическая прочность полипропилена, если согласно сказанному  $\Phi = 0,68$ , составляет  $E_{\text{пр.вн}} = 16 (3 + 4 \cdot 0,68) 36,65^{1,1} = 4800$  кв/см.

**Экспериментальное приближение.** Электрическую прочность полипропиленовой пленки определяли на переменном токе частотой 50 Гц при 23° в условиях плавного подъема напряжения и усиленного теплоотвода от пленки при помощи массивных плоских электродов. Использовали отечественную двухосноориентированную, весьма однородную пленку изотактического пропилена (марка 04П10/020) толщиной 6—8 мк, не имеющую дефектов поверхности. Результаты измерений представлены в табл. 2. Пробой всегда развивался под электродом; проверка степени однородности поля при пробое была выполнена с помощью системы электродов сферы — плоскость. Электрическая прочность для этой системы оказалась

Таблица 2

Электрическая прочность однородной пленки полипропилена в равномерном поле при 50 Гц

Параметр	Номер образца												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$d$ , мк	8,0	8,0	8,8	8,2	8,5	7,9	6,5	7,0	7,5	7,2	7,2	7,0	8,0
$U_{\text{пр}}$ , кв	3,3	3,2	3,7	3,4	3,7	3,1	2,7	2,8	3,0	2,9	3,1	2,9	3,4
$E_{\text{пр}}$ , кв/см	4120	4000	4200	4150	4360	3930	4160	4000	4000	4030	4300	4140	4250

Параметр	Номер образца											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$d$ , мк	8,2	7,2	7,5	7,0	6,8	7,5	7,4	6,9	6,0	7,5	8,5	7,0
$U_{\text{пр}}$ , кв	3,3	3,1	3,1	3,0	2,7	3,1	3,0	2,8	2,5	3,1	3,2	2,9
$E_{\text{пр}}$ , кв/см	4020	4300	4250	4290	3980	4130	4070	4060	4170	4130	4270	4140

П р и м е ч а н и е.  $U_{\text{пр}}$  — электрическое напряжение, при котором произошел пробой образца  $E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d}$ ;  $d$  — толщина диэлектрика.

незначительно выше, чем для указанных плоских электродов. Анализ результатов измерений (табл. 2) показывает, что соблюдается нормальный закон распределения.

Электрическая прочность (среднее значение)  $E_{\text{пр}} = 4140$  кв/см; стандартное отклонение  $\sigma = 11,8$  кв/см. Коэффициент вариации  $K_{\text{вар}} = \frac{\sigma}{E_{\text{пр}}} \cdot 100 = 2,85\%$ . Согласно стандарту, такой материал классифицируется как однородный.

### Выводы

Для полипропилена на основе сделанных допущений найдено значение удельной энергии образования канала пробоя. По величине этой энергии определена внутренняя электрическая прочность полипропилена:  $E_{\text{пр. вн}} = 4800$  кв/см при  $\Phi = 0,68$ . На значительной партии образцов измерена электрическая прочность однородной бездефектной пленки отечественного полипропилена; в среднем  $\bar{E}_{\text{пр}} = 4140$  кв/см. Как и следовало ожидать, она меньше  $E_{\text{пр. вн}}$ , но является хорошим приближением к расчетному значению  $E_{\text{пр. вн}}$ .

Политехнический институт  
им. М. И. Калинина

Поступила в редакцию  
3 IV 1969

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Р е и н е, Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком, Госэнергоиздат, 1963.
2. Г. И. С к а н а в и, Физика диэлектриков, Физматгиз, 1958.
3. В. И. Веденеев, Л. В. Гурич, В. Н. Кондратьев, В. А. Медведев, Е. Л. Франкевич, Энергия разрыва химических связей, потенциалы ионизации и средство к электрону, Изд-во АН СССР, 1962.
4. Н. В. Смирнов, И. В. Дуинин-Барковский, Краткий курс математической статистики для технических приложений, Физматгиз, 1959.
5. Ю. Н. Вершинин, Электрический пробой твердых диэлектриков, Изд-во Сибирского отд. АН СССР, 1968.