

- [3] Антоненко С.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. В. 9. С. 362-364.
- [4] Антоненко С.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. В. 5. С. 260-263.
- [5] Prade J., Kulikarni A., Wette F. // Solid Commun. 1987. V. 64. N 10. P. 1267-1271.
- [6] Jorgensen J., Schuttler H., Hinks D. et al. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 10. P. 1024-1027.
- [7] Gibson J., Golland A., Milgram M., Vineyard G. // Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 1229-1238.
- [8] Жетбаева М.П., Кирсанов В.В. Расчет атомных конфигураций и взаимодействия дефектов разных типов в металлах. ИЯФ АН КазССР, Препринт № 3-81, Алма-Ата, 1981.

Калининский политехнический институт

Поступило в Редакцию  
2 января 1989 г.  
В окончательной редакции  
14 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 16  
04; 05.2

26 августа 1989 г.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОГО РАЗОГРЕВА В ДИЭЛЕКТРИКАХ

П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов,  
С.Н. Койков

В сильных электрических полях наблюдается электротепловой разогрев диэлектриков, который может завершиться тепловым пробоем [1]. Классическая теория этого явления была разработана Фоком и предполагала экспоненциальную температурную зависимость удельной мощности тепловыделения  $q_v(T)$ , обусловленную диэлектрическими потерями. В указанном случае диэлектрические потери имеют место вследствие сквозной проводимости  $\gamma = \gamma_0 \exp\left[-\frac{W}{kT}\right] = A \exp[b(T - T_0)]$  (как на постоянном, так и на переменном токе). В действительности температурная зависимость  $q_v(T)$  на переменном токе может иметь максимум, обусловленный релаксационными диэлектрическими потерями. В данной работе показано, что в этом случае могут наблюдаться своеобразные явления - наличие двух устойчивых состояний теплового равновесия и распространение волнового фронта разогрева по диэлектрику.

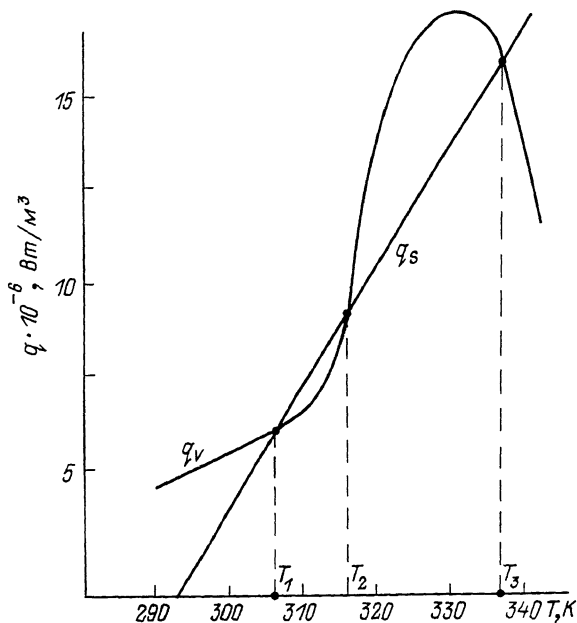


Рис. 1. Иллюстрация состояний равновесия между тепловыделением и теплоотводом в пленке ПВА.

Существование двух устойчивых стационарных состояний теплового равновесия иллюстрируется рис. 1, где приведена зависимость от температуры удельной мощности тепловыделения  $q_v(T)$  в пленке поливинилацетата ПВА толщиной 25 микрон с фольговыми алюминиевыми электродами толщиной 5 микрон (ширина пленки – 8 мм, длина – 45 мм). Здесь же приведена зависимость потока теплоотвода с поверхности пленки  $q_s$  в соответствии с законом Ньютона

$$q_s = \alpha(T - T_{oc}) \frac{1}{2h}. \text{ Напряжение на электродах составляет } U_{эфф} = 140 \text{ В.}$$

При этих условиях устойчивыми тепловыми состояниями являются состояния с температурами  $T_1 = 308 \text{ К}$  и  $T_2 = 338 \text{ К}$ . В случае повышения температуры до точки неустойчивого равновесия  $T_2$  в каком-либо участке пленки или при соответствующем увеличении  $q_v$  (за счет повышения  $U$ ) и пленке наблюдается процесс распространения фронта волны разогрева до температуры  $T_3$ . Для экспериментального изучения этого эффекта на поверхности пленки располагалась цепочка из восьми специально изготовленных методом тонкослойной технологии  $Co-Ni$  термопар на полиимидной подложке толщиной 5 микрон. Толщина металлизации составляла несколько сотых микрона, что обеспечило малую инерционность термопар ( $\sim 100 \text{ мкс}$ ). Сигналы с термопар последовательно коммутировались электронными

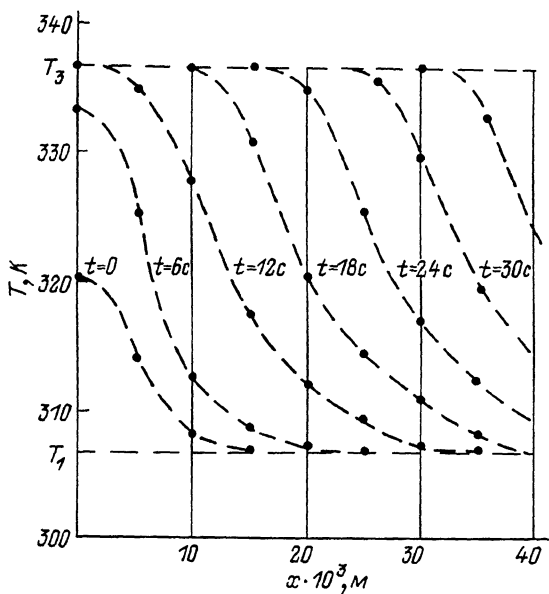


Рис. 2. Температурно-временное поле в экспериментальном образце. Опытные точки отмечены черными кружками.

ключами и выводились на двухкоординатный самописец. Результаты измерений, представленные на рис. 2, свидетельствуют о распространении фронта температурной волны вдоль пленки ПВА со скоростью  $V_{\text{эксн}} \approx 1$  мм/с.

Теоретический анализ этого эффекта можно провести на основе решения нелинейной одномерной задачи теплопроводности, поскольку ввиду малой толщины пленки перепад температуры по слою незначителен:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v - q_s, \quad (1)$$

где  $x$  - координата вдоль пленки,  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  - известные характеристики.

Зависимость  $(q_v - q_s)$  от температуры, соответствующая рис. 1, может быть аппроксимирована полиномом третьей степени:

$$q_v - q_s = \omega \epsilon_0 E^2 \cdot k (T - T_1)(T - T_2)(T_3 - T), \quad (2)$$

где  $k \cdot (T - T_1)(T - T_2)(T_3 - T) = \epsilon''(T) - \frac{\alpha(T - T_{0c})}{\omega \epsilon_0 E^2 \cdot 2h}$ ,  $E$  - действующее значение напряженности электрического поля в образце.

Решение уравнения (1) с учетом (2) имеет следующий вид [3]:

$$T = \frac{T_1 + T_3 \exp\{-\beta(x + vt)\}}{1 + \exp\{-\beta(x + vt)\}},$$

$$\text{где } \beta = (T_3 - T_1) \sqrt{\frac{\omega \epsilon_0 E^2 k}{2\lambda}}, \quad v = (2T_2 - T_1 - T_3) \sqrt{\frac{\omega \epsilon_0 k \lambda E^2}{2}} \cdot \frac{1}{\rho c_p}.$$

Подстановка значений параметров для скорости волнового фронта  $V$  дает (с учетом диэлектрических характеристик ПВА) значение  $v_{расч} \approx 1.5$  мм/с, что хорошо согласуется с экспериментальными данными  $v_{эксп} \approx 1$  мм/с на рис. 2.

Распространение волнового фронта электротеплового разогрева в полимерных пленках с релаксационным максимумом фактора потерь  $\epsilon''(T)$  представляет собой автоволновой процесс в нелинейной активной среде. Такого рода процессы обнаружены, например, при переходе пленочного режима кипения в пузырьковый в ТВЭЛх атомных реакторов [2], при тепловом распространении нормальной фазы в ВТСП проводниках [4] и др. В данной работе экспериментально и теоретически показано, что такого рода процессы могут иметь место и в диэлектриках при электротепловом разогреве при немонотонной зависимости фактора потерь от температуры.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б о р и с о в а М.Э., К о й к о в С.Н. Физика диэлектриков. Л.: ЛГУ, 1976.
- [2] Автоволновые процессы в системах с диффузией / Под редакцией М.Т. Греховой, Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
- [3] Е м е л ь я н о в О.А. В сб.: Электрофизика слоистых структур. Тез. докл. У1 Всесоюзной конференции по физике диэлектриков, 1988. В. 7. С. 106.
- [4] А л ь т о в В.А., Л ь в о в с к и й Ю.М., С ы ч е в В.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 2.

Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию  
5 июня 1989 г.