

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ РАЗРЯДА В ПОЛИМЕРАХ ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НАПРЯЖЕНИЯ

В. С. КОРОЛЕВ, Н. М. ТОРБИН

(Представлена научным семинаром НИИ высоких напряжений)

Экспериментальным исследованиям электрической прочности твердых диэлектриков в наносекундном диапазоне напряжений посвящены лишь отдельные работы [1, 2, 3].

Изучение электрических свойств органических электроизоляционных материалов при малых экспозициях напряжения представляет интерес как для физики пробоя, так и для практических вопросов поведения изоляции в конструкциях высоковольтной наносекундной техники.

В работе [1] исследована электрическая прочность некоторых полимеров и слюды в однородном поле при экспозиции напряжения  $5 \cdot 10^{-9} \div 10^{-6}$  сек. Толщина образцов составляла 0,002—0,008 см. Увеличение пробивного напряжения было обнаружено при экспозиции около  $5 \cdot 10^{-9}$  сек.

В однородном поле для фторопласта, гетинакса, оргстекла и винилпласта измерено запаздывание разряда при пробое на вершине прямоугольном импульсе [2]. Длина импульса изменялась от 3 до 100 нсек. Повышение электрической прочности в этих диэлектриках наблюдалось в интервале от 2 до 20 нсек, средняя скорость разряда составляла около  $3 \cdot 10^6$  см/сек. Толщина образцов в данной работе равна 0,01 см.

Исследованиями Дитмера [3] в неоднородном поле установлено, что время запаздывания в оргстекле и эпоксидной смоле толщиной 0,3 см составляет порядка 20 нсек. Пробой также производился на плоской части прямоугольного импульса с длиной фронта около 10 нсек.

В этой работе получены весьма высокие скорости развития разряда, достигающие  $10^8$  см/сек, которые вызывают сомнения у некоторых исследователей [4].

Диттерт [5] исследовал зависимость электрической прочности эбонита и бакелизированной бумаги толщиной порядка десятых долей миллиметра в однородном поле. Им также не было обнаружено запаздывание разряда вплоть до  $10^{-8}$  сек.

Из приведенных работ следует, что время запаздывания разряда в высокопрочных диэлектриках мало и составляет  $3 \cdot 10^{-9}$  сек, а скорости развития разряда могут достигать  $10^8$  см/сек. Нами проведены исследования запаздывания разряда в неоднородном поле для полистирола, полиэтилена высокого давления, органического стекла, фторопласта-4 и пластифицированного полихлорвинила в целях установления связи электрической прочности и времени запаздывания разряда с физико-химическими свойствами указанных полимеров. Для щелочно-галоидных крис-

таллов давно обнаружена зависимость между их физическими константами и величиной электрической прочности [6].

Для некоторых полимеров и углеводородных жидкостей предприняты попытки установить связь между электрической прочностью с величиной межмолекулярного сцепления (когезией) [7—10]. Нами также сделана попытка проследить подобное соотношение в области наносекундных экспозиций напряже-

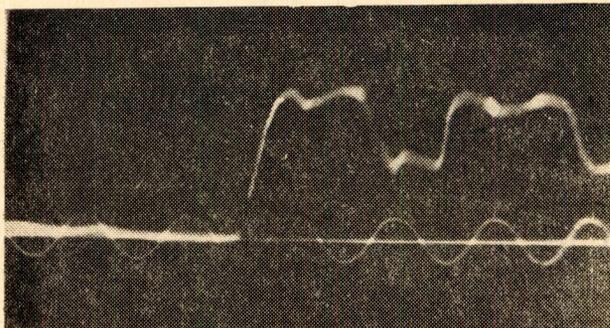


Рис. 1. Оциллограмма импульса с пробоем на плоской части. Частота градуировочных колебаний 100 мгги

ния в неоднородном поле для перечисленных выше полимеров. Спад напряжения за 30 нсек составляет 7%. Оциллограмма пробоя приведена на рис. 1.

Пробой образцов производился в поле острие — плоскость при обоих полярностях острия. В работе использовались образцы размером  $30 \times 30 \times 8$  мм с конической выточкой, радиус закругления которой составлял 60 мк. В выточку запрессовывалась графитовая дудра и прижималась электродом.

Плоскость диаметром 40 мм выполнена из латуни. Толщина образцов в месте пробоя для полиэтилена и полистирола составляла 1,5 мм, для остальных диэлектриков — 3 мм. Статическое пробивное напряжение образцов определялось пробоем на фронте импульса с длиной  $\tau_{\phi} = 6 \cdot 10^{-6}$  сек. Регистрация импульсов производилась осциллографом ОК-19.

Результаты экспериментов приведены на рис. 2 а, б в виде зависимостей средних пробивных градиентов от времени приложения напряжения. Каждая кривая построена по 4—5 точкам. На каждую точку пробивалась партия образцов из 35 шт., статистическая обработка проводилась по методике Лауэ.

Штриховыми линиями на рис. 2 б обозначены средние пробивные градиенты для полистирола и оргстекла при экспозиции напряжений  $6 \cdot 10^{-6}$  сек.

Из приведенных кривых видно, что коэффициент импульса в неоднородном поле достигает  $2,2 \div 2,4$  при уменьшении экспозиций от  $6 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-9}$  сек, что можно объяснить запаздыванием разряда.

При пробое фторопласта-4 и пластифицированного полихлорвинила различие в пробивных напряжениях при различных полярностях острия слабо выражено во всем интервале времени от 30 до 3 нсек, в то время как при экспозиции напряжения  $6 \cdot 10^{-6}$  сек оно составляет около 20% для обоих диэлектриков.

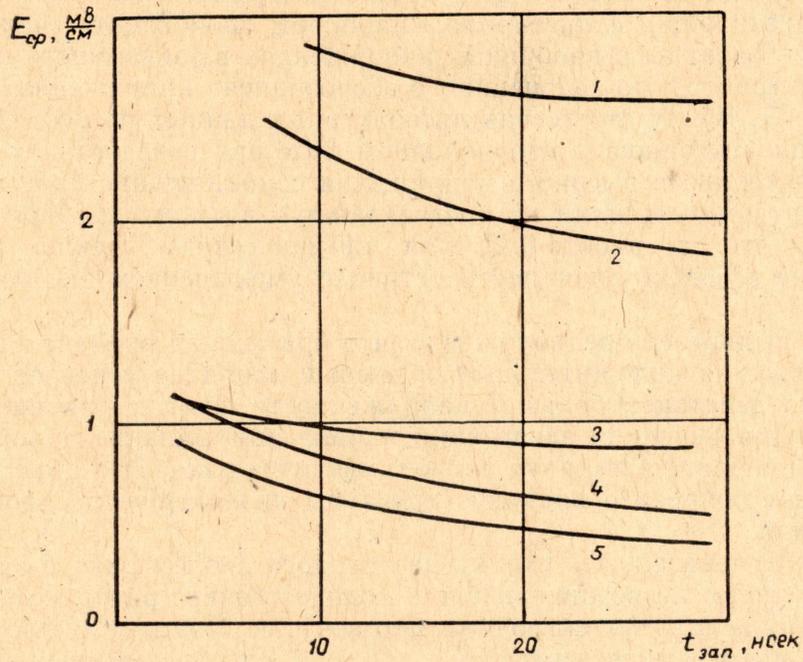
Для полистирола и органического стекла при экспозиции  $6 \cdot 10^{-6}$  сек величина пробивного напряжения при отрицательном острие на 30%, а для полиэтилена на 36% выше, чем при положительном острие. Эти

ных экспозиций напряжения в неоднородном поле для перечисленных выше полимеров.

Выбор диэлектриков произведен по типу внутримолекулярных связей структуры.

Работа выполнена на генераторе наносекундных импульсов напряжения, сконструированном в Томском политехническом институте [11].

Импульсы напряжения приблизительно прямоугольной формы с фронтом 3 нсек и длиной плоской



a

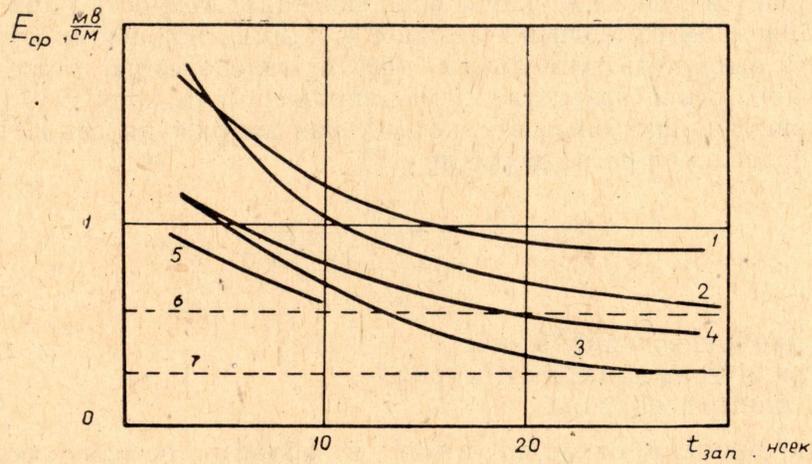


Рис. 2 а, б. Зависимость средней пробивной напряженности от времени приложения напряжения для полистирола 1, полиэтилена 2, органического стекла 3, фторопласта-4 (4) и поливинилиденхлорида 5, 6 и 7 — средние пробивные напряженности для полистирола и органического стекла при экспозиции напряжения  $6 \cdot 10^{-6}$  сек.

а) при отрицательной полярности острия  
 б) при положительной полярности острия

данные согласуются с данными работ [3, 7, 8]. При пробое в интервале времени воздействия напряжения  $3 \div 30 \cdot 10^{-9}$  сек для органического стекла наблюдается значительное снижение эффекта полярности острия, а для полиэтилена и полистирола, наоборот, происходит значительное увеличение разницы в пробивных напряжениях в зависимости от полярности электродов, по сравнению с экспозицией напряжения  $10^{-6}$  сек (рис. 2 а, б). Ввиду отсутствия литературных данных по исследованиям твердых диэлектриков в неоднородном поле при воздействиях наносекундных импульсов высокого напряжения сопоставление наших результатов с другими данными не представляется возможным. Можно лишь отметить, что в работе [12] для органического стекла отмечено увеличение эффекта полярности острия с уменьшением экспозиции напряжения.

Автор выдвигает предположение, что при малых временах воздействия напряжения положительный объемный заряд не успевает рассасываться под действием большой напряженности поля на границе заряда, поэтому с уменьшением экспозиции напряжения влияние объемного заряда при пробое диэлектрика должно увеличиваться. Это объяснение не затрагивает вопроса о влиянии структуры диэлектрика на формирование разряда.

Бёр [13] показал, что структура твердого диэлектрика в значительной мере влияет на возникновение и количественное распределение объемного заряда в межэлектродном промежутке. Поэтому есть основания полагать, что ход зависимостей  $E_{cp} = f(t_{зап})$  при различных полярностях острия в сильных полях обуславливается не только значением электрического поля и временем приложения напряжения, но и структурой диэлектрика.

При наложении весьма кратковременных импульсов напряжения у острия создается очень высокая локальная напряженность поля. В этом случае источником свободных электронов помимо ионизации столкновением может выступить туннельный эффект зинеровского типа, вероятность каждого резко возрастает при напряженности поля  $E = 10^7$  в/см.

В условиях наших опытов максимальная напряженность поля у острия при определении ее по формуле [15]:

$$E_{max} = \frac{2V}{r \cdot \ln \left( 1 + \frac{4d}{r} \right)},$$

где  $V$  — пробивное напряжение,  
 $r$  — радиус закругления острия,  
 $d$  — толщина образца,

в интервале времени от 30 до 4 нсек в области острия составляла  $1,0 \cdot 10^7 \div 2,2 \cdot 10^7$  в/см.

При больших напряженностях поля и малых экспозициях приложения напряжения возможно несколько иное перераспределение объемных зарядов у электродов в отличие от микросекундного диапазона приложения напряжений.

При отрицательном острие ввиду одновременного развития многочисленных лавин с катода положительный объемный заряд может достигнуть большой величины, что приведет к резкому торможению развивающихся лавин. Потребуется значительное повышение напряжения на электродах для дальнейшего развития разряда. В случае положительного острия будут наблюдаться, с одной стороны, некоторая компенсация положительного объемного заряда туннельным эффектом, но, с другой стороны, ввиду усиления ударной ионизации из-за большого числа элект-

ронов в области острия будет увеличиваться положительный заряд вблизи острия.

Кроме того, развитие объемного заряда в глубь промежутка может ограничиваться малой экспозицией напряжения. Из этого следует, что накопление объемного заряда, оказывающего решающую роль в формировании разряда, будет зависеть от величины потенциала ионизации молекул диэлектрика.

Табл. 1 показывает, что наибольшим потенциалом ионизации, а следовательно, наименьшей величиной объемного заряда характеризуется фторопласт-4 и пластифицированный полихлорвинил (поливинилиденхлорид) [16].

Таблица 1

Полимер	Потенциал ионизации  эв
Полистирол	8,67
Полиэтилен	10,2
Полиметилметакрилат	11,3
Поливинилиденхлорид	13,2
Политетрафторэтилен	13,3±0,1

Тогда эффект полярности острия при пробое фторопласта-4 и поливинилиденхлорида в интервале  $4 \div 30$  нсек должен быть выражен слабо, в то время как для полиэтилена и полистирола иметь значительную величину.

При дальнейшем уменьшении экспозиции напряжения влияние полярности острия при пробое диэлектриков должно уменьшаться.

В наших исследованиях также установлено, что время запаздывания разряда при положительной полярности острия в органическом стекле и полистироле составляет  $24 \div 30 \cdot 10^{-9}$  сек, что согласуется с данными работы [3].

Малые величины времени запаздывания и большие перенапряжения позволяют пренебречь статическим временем запаздывания и считать запаздывание разряда временем формирования. Тогда средняя скорость разряда определится как

$$V_{\text{ср}} = \frac{d}{t_{\text{зап}}},$$

где  $d$  — толщина диэлектрика,

$t_{\text{зап}}$  — время запаздывания разряда.

Для органического стекла при  $E_{\text{ср}} = 16$  мв/см и времени формирования  $4 \cdot 10^{-9}$  сек  $V_{\text{ср}} = 7 \cdot 10^7$  см/сек, что подтверждает данные работы [3]. Это значение скорости развития разряда на порядок превышает скорость распространения разряда в этом диэлектрике в однородном поле [2] и соответствует скорости разряда в воздухе.

Очевидно, в очень сильном поле электроны, обладая очень высокими скоростями, испытывают меньшее торможение при столкновениях с атомами твердого вещества.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. При пробое твердых диэлектриков в наносекундном диапазоне экспозиций напряжений на развитие объемного заряда большое влияние оказывает структура диэлектрика.

2. Время запаздывания разряда в органическом стекле и полистирола в неоднородном поле составляет  $2,4 \div 3 \cdot 10^{-8}$  сек.

3. Средняя скорость развития разряда в полимерах в интервале экспозиций напряжения  $4 \div 30 \cdot 10^{-9}$  сек составляет  $10^7 \div 7 \cdot 10^7$  см/сек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Мельников. Электричество, 1959, № 2, стр. 64.
2. М. Н. Лисецкая, Т. А. Женченко. Изв. ТПИ, 1965, т. 139, стр. 102.
3. Dittmer V. Arch. für Electrotech., 1963, № 3, стр. 172.
4. Соорер R. Brit. For. Appl. Phys., 1966, № 2, стр. 149.
5. Д. Биндер. Блуждающие волны в электрических сетях. Л., ГОНТИ, 1935.
6. И. И. Каляцкий, А. И. Лимасов, Изв. СО АН СССР, Серия техн. наук, 1964, № 2, стр. 79.
7. А. И. Лимасов, А. Т. Чепиков. Изв. СО АН СССР, 1962, № 7, стр. 96.
8. А. А. Воробьев. Физические свойства ионных кристаллических диэлектриков, кн. 1, Томск, ТГУ, 1960.
9. Н. И. Воробьев. Электричество, 1960, № 3.
10. А. А. Воробьев, А. Ф. Калганов. Изв. ТПИ, 1956, т. 95, стр. 97.
11. Г. А. Воробьев, Н. С. Руденко. ПТЭ, 1965, № 1, стр. 42.
12. Г. А. Воробьев. Изв. ТПИ, 1956, т. 91, стр. 89.
13. К. Бёр. АН, Серия физическая, 1960, № 1, стр. 43.
14. Г. И. Сканава. Физика диэлектриков, 1958.
15. Д. Беркс, Д. Шулман. Прогресс в области диэлектриков, Госэнергоиздат, 1962, стр. 24.
16. В. И. Веденеев, Л. В. Гурвиц, В. Н. Кондратьев. Потенциалы ионизации и средство к электрону. Изд-во АН СССР, 1962.