

О БАРЬЕРНОМ ЭФФЕКТЕ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Д. Д. РУМЯНЦЕВ, Н. М. ТОРБИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
высоких напряжений)

Повышение пробивных напряжений воздушных промежутков или жидких диэлектриков при наличии барьера широко используется в практике. Известно, что при определенном расположении барьера в неоднородном поле в воздухе [1, 3, 5] и в жидком диэлектрике [5, 7] пробивное напряжение промежутка можно увеличить на 50—200% по отношению к пробивному напряжению без барьера. Наибольшее увеличение пробивного напряжения в воздухе и трансформаторном масле наблюдается в резко неоднородном поле электродов «острие — плоскость» при положительной полярности острия на постоянном напряжении, когда барьер располагается на 10—25% длины промежутка от острия. Барьерный эффект наблюдается при всех видах воздействия напряжения: постоянном, переменном, импульсном. Что касается механизма барьерного эффекта, то предположения о нем весьма противоречивы.

Волощенко [2] считает, что механизм барьерного эффекта заключается в преобразовании электрического поля объемным зарядом, сконцентрированным на барьере, и пробивное напряжение промежутка «острие — плоскость» определяется участком барьер — плоскость, где поле приближается к однородному.

Комельков и Лифшиц [3] также считают, что решающую роль в барьерном эффекте играет положительный объемный заряд, но пробивное напряжение определяется участком острие-барьер.

Браго и Стекольников [4] считают, что достаточным условием завершения пробоя является разрушение барьера ветвями короны, а роль объемного заряда в барьерном эффекте незначительна.

Николаевская [6] сводит роль барьера к «механическому препятствию» для развивающихся стримеров. Таким образом, достаточно ясного представления о физической природе барьерного эффекта в воздухе и жидких диэлектриках пока нет.

Экспериментальные результаты по пробоем твердых диэлектриков на импульсном напряжении, полученные в последнее время [8—10], позволили установить ряд аналогий в развитии разряда в твердых и газообразных диэлектриках.

Показано [11, 12], что повышение пробивного напряжения при наличии барьера наблюдается и в твердых диэлектриках. В [11] указывается, что на импульсном напряжении барьеры из триацетатной пленки и металлической фольги в каменной соли увеличивают пробивное напряжение

ние на 18—20% по отношению к пробивному напряжению без барьера. Барьеры из гетинакса и текстолита в кабельной массе МК-45 и чистом парафине увеличивают пробивное напряжение до 165—170% [12].

В данной работе проводились исследования изменения пробивных напряжений различных твердых диэлектриков при расположении в них тонкого барьера из высокопрочного материала. Исследовался барьерный эффект в стекле, каменной соли, целлулоиде, бумажно-масляной изоляции.

Методика эксперимента

Образцы из стекла, каменной соли, целлулоида составлялись из пластин различной толщины. Барьер помещался между пластинами. Расстояние от высоковольтного электрода до барьера изменялось с помощью комбинации расположения пластин. Общая толщина образца в процессе эксперимента оставалась неизменной.

При исследовании влияния барьеров на электрическую прочность бумажно-масляной изоляции образцы набирались из листов кабельной бумаги толщиной 0,12 мм. Бумага пропитывалась трансформаторным маслом. Листы размером 20×20 см накладывались друг на друга и зажимались в изоляционную рамку. Для снижения вероятности воздушных включений между листами сборка образца производилась под маслом. Барьер помещался между листами. В качестве барьеров использовались пленки органических материалов (фторопласт-4, полиэтилен, полистирол), слюда, триацетатная пленка и металлическая фольга. Толщина барьеров из слюды, фольги и триацетатной пленки составляла 5—7 мк, толщина органических пленок — 25—30 мк.

Исследования проводились на постоянном, переменном и импульсном напряжениях. Источником переменного и постоянного напряжений служили испытательный трансформатор на 150 кВ и выпрямительная установка, собранная по схеме утроения напряжения. Источником импульсного напряжения служили генераторы напряжений на 100 кВ с емкостью в разряде 11000 пФ и на 1000 кВ с емкостью в разряде 22500 пФ.

При пробое на импульсах пробой происходил на фронте импульса. Напряжение на образце измерялось с помощью осциллографа ОК-19М. Перекрытые или частично перекрытые образцы отбраковывались. Пробой образцов производился в трансформаторном масле в резко неравномерном поле электродов «острие-плоскость». Острие служило высоковольтным электродом, плоскость заземлялась.

Результаты экспериментов

Некоторые зависимости, полученные при исследовании влияния барьера на импульсное пробивное напряжение стекла (1,2) и каменной соли (3,4), приведены на рис. 1. Толщина образцов $d = 3$ мм и $d = 5$ мм. Как видно из рис. 1, барьерный эффект снижается при удалении барьера от острия. Максимальное упрочнение оказывает барьер из металлической фольги (4) — до $1,27 U_0$. В стекле наибольшее повышение $U_{пр}$ наблюдается, при барьере из слюды (2) — до $1,19 U_0$, где U_0 — пробивное напряжение без барьера.

На рис. 2 и 3 представлены результаты исследования барьерного эффекта в целлулоиде. На рис. 2 представлено изменение $U_{пр}$ целлулоида при барьере из полиэтиленовой пленки в зависимости от расположения барьера на постоянном (1,2) и переменном (3) напряжениях. Толщина образца $d = 1,5$ мм.

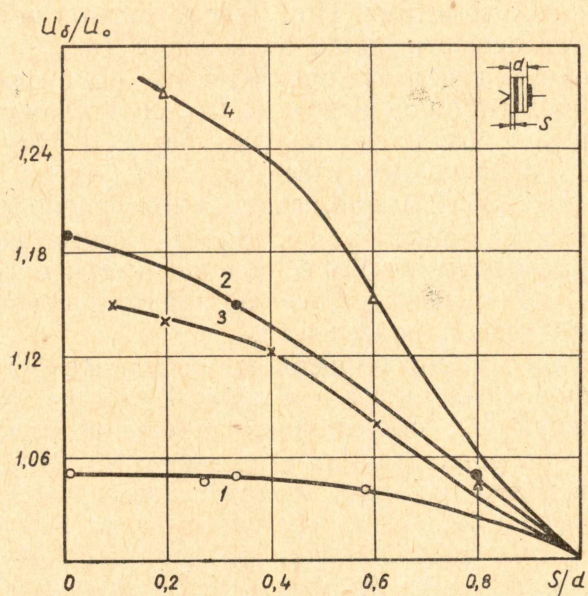


Рис. 1. Влияние положения барьера на пробивное напряжение стекла и каменной соли. Барьер в стекле: 1 — полиэтиленовая пленка, 2 — слюда; барьер в каменной соли: 3 — триацетатная пленка, 4 — металлическая фольга.

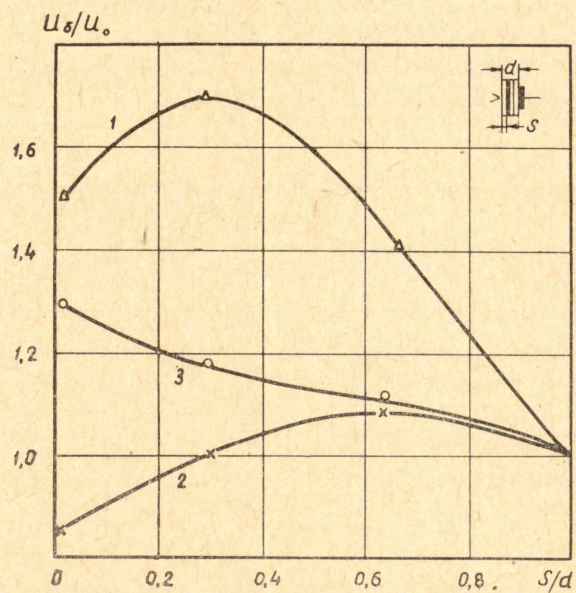


Рис. 2. Влияние барьера из полиэтиленовой пленки на пробивное напряжение целлюлозы. 1 — постоянное напряжение, острие положительной полярности, 2 — постоянное напряжение, острие отрицательной полярности, 3 — переменное 50 гц напряжение.

Как следует из рис. 2, максимальное повышение пробивного напряжения (до $1,7 U_0$) наблюдается на постоянном напряжении при положительной полярности острия. При отрицательной полярности острия барьер не вызывает существенного повышения $U_{пр}$, а при расположении барьера вплотную к острию наблюдается даже снижение $U_{пр}$.

На рис. 3 представлена зависимость $U_{гр}$ целлулоида с барьером из пленки фторопласта-4 от расположения барьера. Толщина образца $d = 8$ мм. Длина фронта импульса $\tau_{срр} = 10$ мксек. Максимальное увеличение $U_{пр}$ (до $1,35 U_0$) наблюдается при расположении барьера на $0,25 d$ от острия и не зависит от полярности импульса. Следует отметить, что при расположении барьера вплотную к острию повышение $U_{пр}$ наблюдается при положительной полярности острия и не наблюдается при отрицательной полярности.

Результаты исследования барьерного эффекта в бумажно-масляной изоляции представлены на рис. 4 и в табл. 1. На рис. 4 приведены зависимости повышения $U_{пр}$ образцов из кабельной бумаги от расположения барьеров из фторопласта-4 на импульсном (1, 2) и переменном (3) напряжении. Как видно из рис. 4, наибольшее увеличение пробивного напряжения (до $1,24 U_0$ на переменном и до $1,14 U_0$ на импульсном) наблюдается при расположении барьера на $0,20-0,40 d$ от острия. Барьерный эффект выше на импульсах большей длительности.

Исследование влияния барьера на $U_{пр}$ при положительных и отрицательных импульсах позволило установить, что при временах менее 10^{-5} сек максимальный барьерный эффект приблизительно одинаков при обеих полярностях.

Был исследован барьерный эффект в бумажно-масляной изоляции при барьерах из полистирола и полиэтилена. Характер изменения $U_{пр}$ аналогичен кривой 2 рис. 4. Максимальное повышение $U_{пр}$ для полистирола $1,16 U_0$, для полиэтилена — $1,10 U_0$.

Результаты исследования влияния двух барьеров на $U_{пр}$ образцов из кабельной бумаги приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия эксперимента	Расположение барьеров		U_6/U_0
	1 барьер	2 барьер	
Импульсы положительной полярности с длиной фронта 10^{-5} сек	0,1	0,1	1,18
	0,1	0,35	1,30
Число листов в образце—20	0,35		
Материал барьера—полистирол		0,35	1,15
	0,35	0,7	1,13

Как видно из таблицы, максимальное повышение $U_{пр}$ наблюдается при расположении барьеров на 0,1 и 0,35 толщины образца от острия. Другие варианты расположения барьеров дают меньшее увеличение $U_{пр}$.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что барьерный эффект наблюдается в различных твердых диэлектриках: стекле, каменной соли, целлулоиде, бумажно-масляной изоляции.

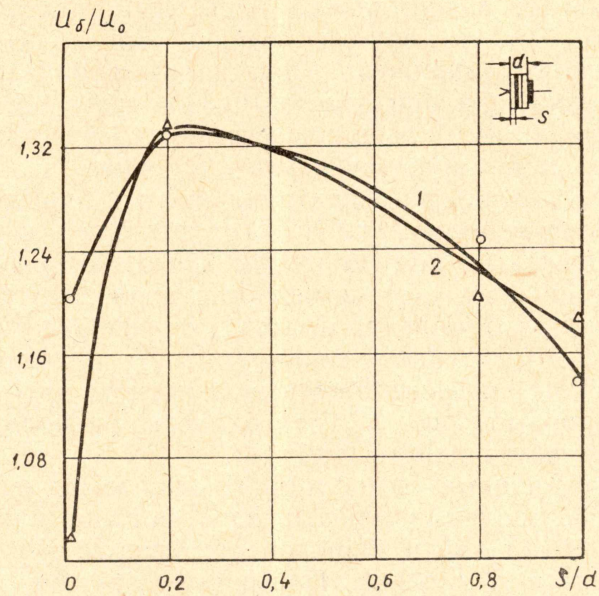


Рис. 3. Влияние барьера из фторопластовой пленки на пробивное напряжение целлюлозы.
Импульсы с $\tau_{фр} = 10^{-5}$ сек: 1 — положительная полярность; 2 — отрицательная полярность.

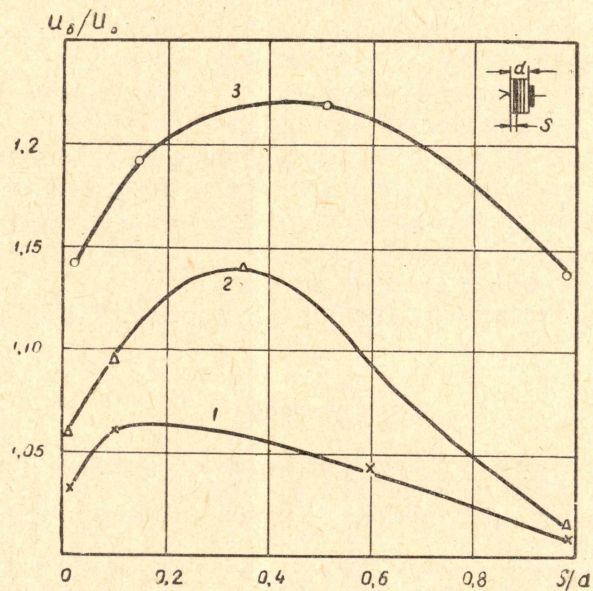


Рис. 4. Влияние барьера из фторопластовой пленки на пробивное напряжение кабельной бумаги.
Импульсы положительной полярности: 1 — $\tau_{фр} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ сек, 2 — $\tau_{фр} = 10^{-5}$ сек, 3 — переменное напряжение 50 гц.

Наблюдается некоторая аналогия в барьерном эффекте в твердом диэлектрике и воздухе: максимальный барьерный эффект наблюдается при расположении барьера вблизи острия (рис. 1—4); наибольшее увеличение пробивного напряжения при наличии барьера происходит на постоянном напряжении при положительной полярности острия, при отрицательной полярности барьер существенно не увеличивает пробивное напряжение и даже может снизить последнее.

Повышение $U_{пр}$ твердого диэлектрика за счет барьера можно объяснить тем, что наличие тонкого слоя высокопрочного диэлектрика позволяет концентрировать на нем объемный заряд, который, распределяясь по барьеру, уменьшает неравномерность поля. Это предположение подтверждается тем, что барьерный эффект уменьшается с уменьшением времени воздействия напряжения (рис. 4) и согласуется с тем фактом, что два барьера, расположенные вплотную друг к другу, приводят к меньшему повышению $U_{пр}$, чем барьеры, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (табл. 1).

Результаты, полученные в настоящей работе и опубликованные в литературе [11, 12], показывают, что использование барьеров в твердом диэлектрике может найти широкое применение в изоляции высоковольтных аппаратов и кабелей. Повышение за счет барьеров пробивного напряжения позволит при тех же габаритах увеличить надежность работы оборудования или повысить рабочие градиенты изоляции.

Выводы

1. Увеличение пробивных напряжений при наличии барьера наблюдается в различных твердых диэлектриках на всех видах напряжения: постоянном, переменном, импульсном.
2. Максимальное упрочнение барьер оказывает при расположении на 0,1—0,4 толщины образца от острия.
3. Наибольший барьерный эффект наблюдается на постоянном напряжении при положительной полярности острия.
4. При временах менее 10^{-5} сек максимальное увеличение пробивного напряжения не зависит от полярности импульса.
5. При наличии двух барьеров максимальный барьерный эффект наблюдается при расположении барьеров вблизи острия на расстоянии 0,1 и 0,35 толщины образца друг от друга.
6. Имеется аналогия в барьерном эффекте в твердых диэлектриках и воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Ф. Волощенко. Влияние барьеров на электрическую прочность воздушных промежутков. Электричество, № 3, 1946.
2. Н. Ф. Волощенко. К вопросу о механизме барьерного эффекта. Электричество, № 6, 1947.
3. В. С. Комельков, А. М. Лифшиц. Влияние барьеров на развитие электрического разряда в длинных промежутках. Изв. АН СССР, 10, 1950.
4. Е. Н. Браго, И. С. Стекольников. Исследование природы длинной искры, VI, Изв. АН СССР, ОТН, 11, 1958.
5. Л. И. Сиротинский (ред.). Техника высоких напряжений. ч. 1, ГЭИ, 1951.
6. Н. Н. Николаевская. К вопросу о механизме барьерного эффекта в воздухе при импульсном напряжении. Тр. ЛПИ, 1, 1954.
7. А. А. Шилван. Исследование методов повышения прочности жидкой и газообразной изоляции путем применения барьеров. Тр. ЛПИ, 1, 1954.
8. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев. Закономерности импульсного пробоя твердых диэлектриков. Изв. АН СССР, сер. физ. 1, 24, 1960.

9. Н. М. Горбин. Предпробивные токи в больших толщинах твердых диэлектриков. Изв. вузов, Энергетика, 10, 1960.

10. Т. Н. Барченко, М. А. Мельников. О возможности стримерного механизма разряда в твердых диэлектриках. Сб. Физика диэлектриков, 247, Изв. АН СССР, 1960.

11. Ю. Н. Леонтьев, Н. М. Горбин. Влияние положения барьера на пробивное напряжение твердых диэлектриков. Изв. вузов, Энергетика, 12, 1961.

12. Б. Митов. Влияние на барери върху пробивного напряжения на твърди диелектрици (болг.). Годишник маш-електротехн. ин-т, 6, 2, 27, 1959.