

О МЕХАНИЗМЕ «БАРЬЕРНОГО ЭФФЕКТА» ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПРОБОЕ ЖИДКОСТЕЙ

В. Я. УШАКОВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института высоких напряжений при ТПИ)

Введение

Под «барьерным эффектом», как известно, понимается повышение пробивного напряжения разрядного промежутка установкой в нем барьера из изоляционного материала. Несмотря на многолетнее использование барьеров на практике для повышения надежности работы и уменьшения габаритов аппаратуры и электрических установок, механизм «барьерного эффекта» изучен недостаточно, особенно для жидкой изоляции. Авторы большинства работ, посвященных изучению «барьерного эффекта» в жидкостях [1, 2 и др.], ограничивались получением количественных данных для определенных условий и не давали достаточно обоснованных объяснений наблюдаемым эффектам.

Для анализа механизма «барьерного эффекта» большой интерес представляют попытки объяснить механизм действия барьеров при импульсном пробое длинных воздушных промежутков, предпринятые в работах В. С. Комелькова и А. М. Лифшиц [3], Н. Н. Николаевской [4], И. С. Стекольниковой [5].

В работе [3] главная роль в «барьерном эффекте» отводится объемным зарядам, оседающим на барьере в результате развития в промежутке стержень — барьер «стримерных» процессов (первичной импульсной короны и короны лидера). Эти заряды тормозят развитие лидерного канала в промежутке стержень — барьер и удлиняют его траекторию, чем и обуславливается повышение пробивного напряжения разрядного промежутка. Достаточным условием завершения разряда в промежутке с барьером считается пробой барьера лидером.

По данным [4], «барьерный эффект» вызван действием барьера как механической преграды для стримеров. Отмечается, что пробой промежутка возможен лишь в том случае, если напряжение на промежутке обеспечивает за барьером градиенты, необходимые для развития там ударной ионизации и образования стримеров. Достаточным условием завершения разряда считается полное перекрытие стримером разрядного промежутка, приводящее к пробое барьера и разрядного промежутка.

Согласно [5], пробой барьера происходит в стадии импульсной короны под действием сильного электрического поля, локализованного на конце ветви короны. Градиенты внешнего электростатического поля за барьером при этом должны быть лишь не менее значения 1 кВ/см ,

при котором может развиваться импульсная корона. Пробой барьера в стадии импульсной короны необходим для освобождения в промежутке определенного количества объемного заряда, участвующего в формировании лидерного канала.

Проведенные ранее исследования пространственно-временного развития разряда в жидкостях в больших разрядных промежутках с неравномерным распределением поля [6, 7] показали, что при разряде в жидкостях отсутствуют первичная импульсная корона и корона лидера, характерные для разряда в длинных воздушных промежутках. В жидкостях зона ионизации, развивающаяся с головки лидерного канала или с электрода, мала и представляет собой сферическое диффузное свечение диаметром около 1—3 мм. Эти результаты дают основание предположить, что оседание зарядов на поверхности барьера вследствие развития ионизационных процессов не может существенно изменить условия развития лидера в промежутке стержень — барьер и, таким образом, не может играть определяющую роль в механизме «барьерного эффекта» при импульсном пробое жидкостей. Экспериментальные исследования подтвердили это предположение.

Экспериментальные результаты и их анализ

Исследовано развитие разряда в трансформаторном масле и дистиллированной воде в промежутках стержень — плоскость при положительной (+С — П) и отрицательной (—С + П) полярностях волны напряжения 1,5/70 мксек. Большинство исследований проведено в промежутках длиной 50 мм. В качестве барьера использовались листы целлулоида (395 мм × 295 мм) толщиной 0,13 мм, укрепляемые для придания необходимой жесткости барьеру на текстолитовой раме. Рамка подвешивалась на четырех нитях и могла перемещаться относительно электродов. В отдельных экспериментах применялись барьеры из органического стекла толщиной 3 мм. Применение в данных экспериментах барьеров из пористых материалов нецелесообразно, поскольку пропитка их в одном случае трансформаторным маслом, а в другом — дистиллированной водой будет влиять на электрическую прочность самого барьера, что исключит возможность сопоставления полученных результатов. Для исследования предпробивного периода разряда и фиксации момента пробоя барьера осуществлялась синхронная запись напряжения на промежутке, оптических пространственно-временных и статических картин разряда. Для записи пространственно-временных картин разряда использовался электронно-оптический преобразователь с усилением света. Схема, методика экспериментов и описание конструкции электродов и разрядных камер приведены в [8].

При воздействии на разрядный промежуток с барьером импульса напряжения разряд, как и в случае отсутствия барьера, начинается вблизи стержневого электрода в виде лидера, развивающегося в глубь промежутка. Лидерный процесс при этом по структуре и скорости развития подобен лидерному процессу в промежутке стержень — плоскость без барьера [6]. При напряжении, меньшем разрядного, лидерный канал подходит к барьеру на расстояние 3—5 мм, после чего почти под прямым углом изменяет направление своего движения. На протяжении 5—10 мм лидерный канал развивается над барьером, затем прижимается к нему и в дальнейшем развивается как скользящий разряд.

При некоторой величине напряжения часть воздействующих импульсов вызывает пробой барьера в точках, удаленных на некоторое расстояние от проекции первоначальной траектории движения лидера на барьер. Дальнейшее увеличение амплитуды импульса напряжения приводит к уменьшению искажения траектории движения лидера барьером

и барьер практически не влияет на развитие лидерного процесса. Пробой лидером барьера всегда сопровождается полным пробоем разрядного промежутка. Описанная картина разряда наблюдается независимо от положения барьера в разрядном промежутке. На рис. 1 показана зависимость процентного повышения 50%-ного пробивного напряжения промежутков С—П в трансформаторном масле от положения целлулоидного барьера.

Из рис. 1 видно, что максимальное увеличение прочности промежутка (30%) за счет барьера отмечается в электродной системе + С — П при расположении барьера практически вплотную к стержневому электроду. При удалении барьера от стержня повышение прочности промежутка за счет барьера сокращается до 15%. В промежутке — С + П при всех положениях барьера барьерный эффект проявляет-

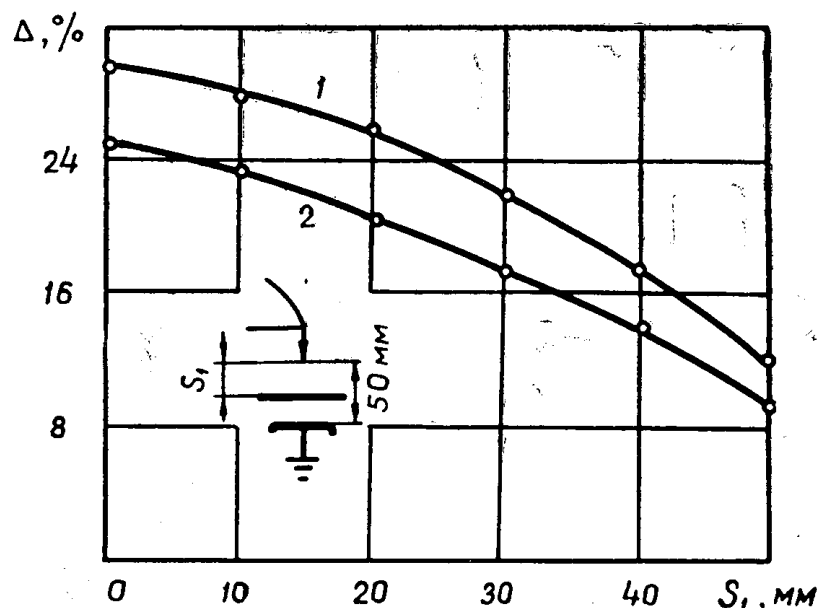


Рис. 1. Зависимость процентного повышения пробивного напряжения промежутков + С — П (1) и — С + П (2) в трансформаторном масле от положения целлулоидного барьера ($d = 0, 13 \text{ мм}$) при $S = 50 \text{ мм}$.

ся в меньшей мере. Пробивное напряжение целлулоидного барьера в неравномерном поле на импульсах $1,5/70 \text{ мксек}$ составляет около $6\text{—}7 \text{ кв}$.

Повышение за счет барьера прочности разрядного промежутка в дистиллированной воде невелико и при положительной полярности стержня изменяется от 13% (барьер у стержня) до 7% (барьер у плоскости), рис. 2. При отрицательной полярности стержня прочность промежутка повышается лишь на 8,5% при расположении барьера на расстоянии 10 мм от стержня. При удалении барьера от стержня на расстоянии более 30 мм повышение пробивного напряжения лежит в пределах погрешности эксперимента.

Картину разряда в промежутках с барьером и качественный механизм «барьерного эффекта» можно представить следующим образом. В промежутке стержень — барьер так же, как и в промежутке стержень — плоскость, лидер развивается за счет ионизационных процессов вблизи головки его канала на расстоянии от нее порядка 1—3 мм. Существенное влияние на развитие лидера барьер начинает оказывать

лишь при подходе лидера к барьеру на расстояние, соизмеримое с размерами зоны ионизации. С этого момента объемный заряд начинает скапливаться на поверхности барьера и тормозит движение лидера к барьеру.

При напряжении, недостаточном для завершения разряда в промежутке с барьером, ионизационные процессы развиваются в жидкости над барьером, т. е. развивается скользящий разряд. В случае, если в ма-

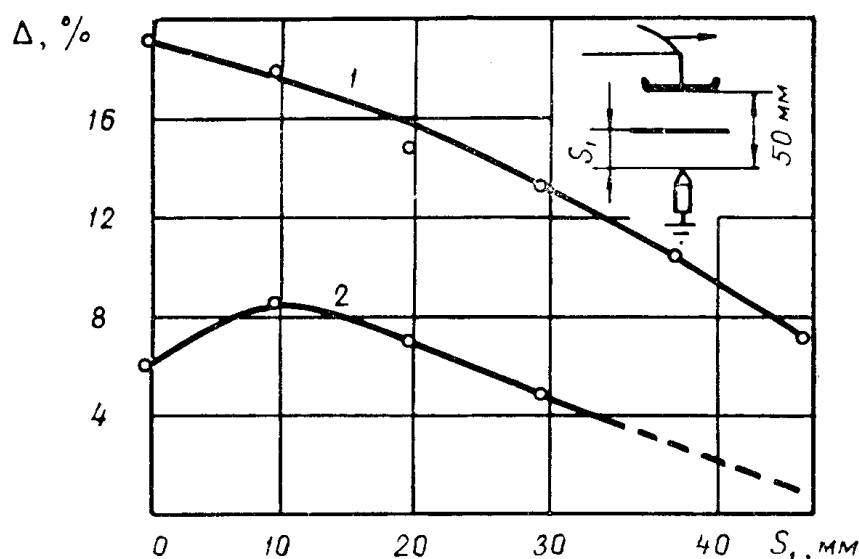


Рис. 2. Зависимость процентного повышения пробивного напряжения промежутков —П+С (1) и +П—С (2) в дистиллированной воде от положения целлюлодного барьера ($d = 0,13 \text{ мм}$) при $S = 50 \text{ мм}$

териале барьера имеются дефекты (микротрещины, газовые включения и др.), лежащие на пути скользящего разряда, может произойти пробой барьера в ослабленном месте. Наличие в барьере небольшого числа сквозных отверстий диаметром до 2 мм практически не влияет на «барьерный эффект». Лидер проходит барьер через отверстие лишь в том случае, если оно расположено на пути движения лидера.

При определенной напряженности поля на головке лидерного канала происходит пробой барьера. Критическая величина потенциала стержневого электрода, вызывающая пробой барьера, зависит от электрической прочности барьера и соотношения диэлектрических проницаемостей жидкости и материала барьера. Вероятно, что пробой барьера происходит в результате развития в нем ионизационных процессов в поле напряженностью 10^6 — 10^7 в/см , локализованном вблизи головки лидерного канала. Проплавление барьера под действием высокой температуры лидерного канала мало вероятно, так как при развитии разряда по поверхности барьера существенного оплавления поверхности барьера не наблюдается.

При подходе лидера к барьеру из целлулоида ($\epsilon = 3,5$) в трансформаторном масле ($\epsilon = 2,3$) напряженность поля в барьере и в прилегающих к нему слоях масла приблизительно одинакова. Для дистиллированной воды напряженность поля в барьере в 23 раза выше, чем в прилегающих слоях воды, и пробой барьера в этом случае происходит при меньших значениях напряжения на электродах. В дистиллированной воде применение барьера в промежутках с резко не-

равномерным полем сопровождается лишь незначительным увеличением пробивного напряжения (рис. 2), а в промежутках с равномерным и слабо неравномерным полем, по данным Э. Маркса [9], вызывает даже существенное снижение пробивного напряжения.

Итак, наиболее вероятным определяющим фактором в «барьерном эффекте» при пробое жидких диэлектриков является действие барьера как преграды, препятствующей развитию лидерного процесса. При этом ввиду малых размеров зоны ионизации, распространяющейся впереди лидерного канала, заряды, осаждающиеся на поверхности барьера, могут играть определенную роль лишь при развитии интенсивных скользящих разрядов. Под действием скользящих разрядов поверхность барьера заряжается, что ведет к перераспределению поля в промежутке. С приближением барьера к электроду с большей кривизной интенсивность и число скользящих разрядов увеличивается, так как почти каждый из многочисленных лидерных каналов, развивающихся от стержня, достигает барьера. Последнее может усилить «барьерный эффект».

Некоторую роль в «барьерном эффекте», вероятно, оказывает и распределение поля по емкостям, образованным системами электрод — барьер и барьер — второй электрод, как это было предположено А. А. Шилваном [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Панов, Л. А. Мравян. Вопросы трансформаторостроения. Тр. ВЭИ, вып. 31, 129—149, 1938.
 2. А. А. Шилван. ТВН, Тр. ЛПИ, № 1, 1954.
 3. В. С. Комельков, А. М. Лифшиц. Изв. АН СССР, ОТН, № 10, 1950.
 4. Н. Н. Николаевская. ТВН, Тр. ТПИ, № 1, 1954.
 5. И. С. Стекольников. Природа длинной искры. Изд. АН СССР, 1960.
 6. И. С. Стекольников, В. Я. Ушаков. ЖТФ, т. XXXV, в. 9, 1965.
 7. В. Я. Ушаков. ЖТФ, т. XXXV, в. 10, 1965.
 8. В. Я. Ушаков. Пробой диэлектриков и полупроводников. Сб. докл. на IV Межвуз. конф. по проб. диэл. и полупроводников, 207—211. Изд. «Энергия», М.—Л., 1964.
 9. E. Marx, ETZ, Bd. 49, S. 50—53, 1928.
-