

ВЛИЯНИЕ НАРУШЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА РАЗРЯДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ В ВОЗДУХЕ

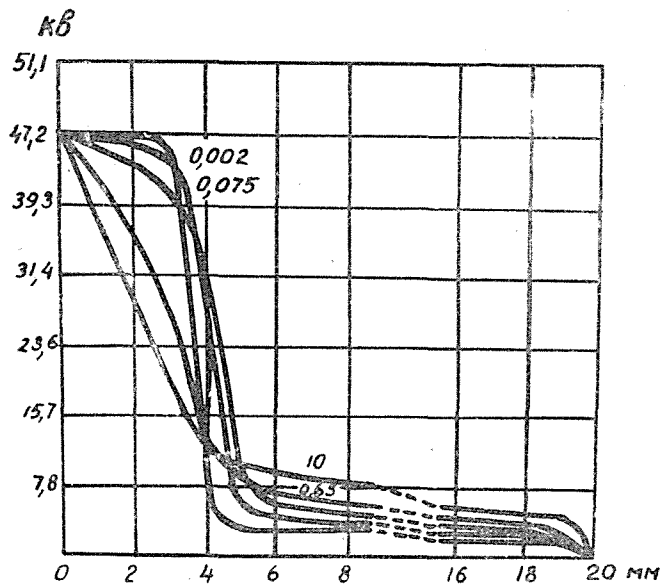
В. Д. КУЧИН

Острые выступы на поверхности электродов создают местные искажения электрического поля. Эти искажения могут вызвать преждевременное коронирование и потерю энергии. Вопрос о влиянии нарушений поверхности электродов на разрядное напряжение представляет большой практический интерес, так как в высоковольтных конструкциях имеются острые углы, болты, заклепки и проч., которые вызывают местное повышение напряженности поля. Влияние нарушений поверхности электрода на разрядное напряжение объясняется следующим образом [1]. Наличие выступа на поверхности электрода вызывает увеличение напряженности поля. Величина изменения напряженности поля зависит не от количества выступов, а от их размеров. Напряженность поля будет больше у выступа, имеющего меньший радиус кривизны. С уменьшением размеров выступа уменьшается область повышенной напряженности электрического поля, причем в распределении силовых линий сохраняется подобие. Возникновение самостоятельного разряда происходит в области повышенной напряженности электрического поля.

Явление пробоя воздуха между электродами с нарушенной поверхностью на постоянном напряжении исследовал Шайбе (1938). Электроды в форме параболоида с радиусом кривизны при вершине 18 см. Расстояние между вершинами параболоидов оставалось постоянным и равным 20 мм. Из вершины одного электрода выдвигалась проволока в межэлектродный промежуток. Размеры острия (длину и диаметр) можно было менять. На фиг. 1 представлена зависимость разрядного напряжения от величины острия. На основании результатов опытов Шайбе утверждает, что наличие на поверхности электрода острий длиной до 3 мм не вызывает значительного снижения разрядного напряжения на постоянном напряжении. Анализируя результаты измерений Шайбе, Коссель делает вывод, что на поверхности высоковольтного электрода в равномерном поле допустимы небольшие или достаточно острые выступы „критической“ длины до 3 мм, которые не будут влиять на величину разрядного напряжения.

Этот вывод находится в противоречии с опытными данными по пробую в неравномерном поле (например, система электродов острие—плоскость). Объясняя явление пробоя, Коссель не учитывает роли объемных зарядов, образовавшихся вследствие изменения конфигурации электрического поля. Объемные заряды вызывают резкое возрастание напряженности поля в некоторых его частях. Для искровых промежутков в пределах равномерного поля пробивная напряженность электрического поля имеет определенную величину, не зависящую от расстояния между электродами. С увеличением длины промежутка шарового разрядника электрическое поле становится неравномерным и пробивная напряженность поля уменьшается. Установлено, что разряд может возникнуть лишь в том случае, когда напряжен-

ность поля достигнет критического значения в ограниченном пространстве [4]. Такое явление произойдет скорее всего у нарушающих выступов. Искра, возникнув в этой области, может распространиться дальше в межэлектродный промежуток, несмотря на то, что напряженность электрического поля в промежутке не достигла критической величины. За счет ионизации промежутка происходит образование объемного заряда. Электроны, дойдя до анода, поглощаются им, а остающийся в разрядном промежутке ионный положительный заряд распределится так, что главная его часть будет сосредоточена у анода. Такое распределение объемного заряда приведет к еще большему искажению первоначального поля. При достижении критической напряженности в нарушенной области электрического поля произойдет частичный пробой промежутка. Ионы в области частичного пробоя можно рассматривать как проводник, который является продолжением острия (стримером). При системе электродов острие—пло-



Фиг. 1. Зависимость пробивного напряжения от величины острия на поверхности электрода на постоянном напряжении по Шайбе.

скость стример легче развивается в том случае, если острие положительное. Следовательно, пробивная напряженность при отрицательной полярности острия будет выше, чем при положительной полярности. Для того, чтобы при отрицательной полярности продолжался разряд, необходимо увеличить поверхностную напряженность поля, т. е. повысить напряжение. Стример удлиняется и при определенном напряжении соединит оба электрода проводящим каналом. Искажение поля объемным зарядом вызовет снижение напряжения пробоя. Таким образом, с учетом влияния объемных зарядов самостоятельный разряд происходит при пониженном напряжении. Особенно заметно уменьшается разрядное напряжение в резко неравномерном поле, где объемные заряды играют весьма значительную роль, а разрядное напряжение в сильной степени зависит от полярности электродов [3].

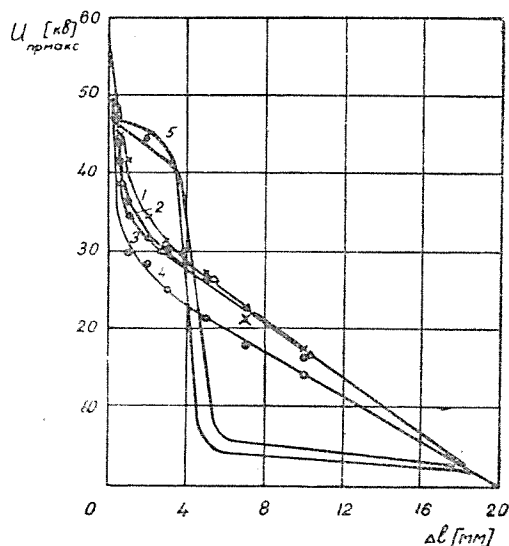
До настоящего времени вопрос влияния нарушения поверхности электрода на разрядное напряжение недостаточно изучен, хотя он имеет большое значение. Отсутствуют опытные данные о влиянии нарушения поверхности электрода на разрядное напряжение на импульсах. При сверхвы-

соких электрических напряжениях и больших расстояниях между электродами встречаются новые физические явления и особенности в работе установок, которые не учитываются или не имеют места при более низких напряжениях. Поэтому прибегают к сложным устройствам для регулирования поля с целью получения обычных рабочих градиентов потенциала в конструкциях аппаратов и установок сверхвысоких напряжений. Повышение рабочих градиентов и сокращение габаритов установок достигается равномерной нагрузкой изоляции путем создания благоприятной конфигурации электрического поля установки. Была поставлена задача исследовать влияние нарушения поверхности электрода на разрядное постоянное и импульсное напряжения в воздухе и масле и дать практические рекомендации по обработке поверхностей высоковольтной аппаратуры и оборудования.

Измерялось разрядное напряжение между шарами диаметром $d_{шара} = 50$ мм с нарушенной поверхностью на постоянном и импульсном напряжениях в воздухе. Нарушающим выступом служила проволока различной длины и различного диаметра, которая пропусклась через шар. Обработ-

Фиг. 2. Зависимость пробивного напряжения от величины острия на поверхности электрода в воздухе. Напряжение постоянное.

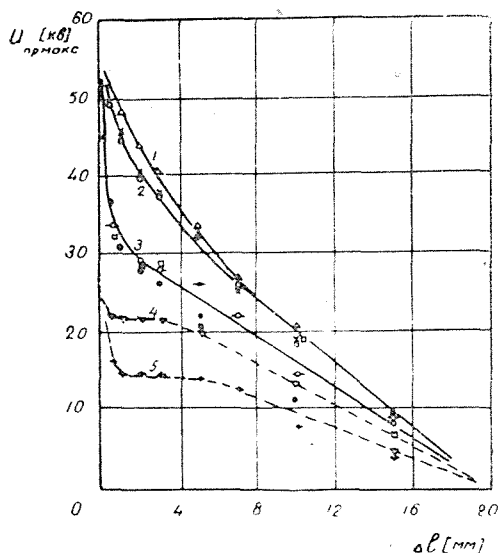
$U_{пр. макс}$ — пробивное напряжение.
 Δl — длина острия.
 1 — проволока диаметром 0,07 мм; острие (—). 2 — проволока диаметром 0,07 мм; острие (+). 3 — проволока диаметром 0,18 мм; острие (—). 4 — проволока диаметром 0,18 мм; острие (+). 5 — зависимость Шайбе (проволока диаметром 0,075 мм). 6 — зависимость Шайбе (проволока диаметром 0,2 мм).



ка конца проволоки является несущественной, так как при импульсах он слегка оплавляется. В опытах расстояние между шарами оставалось постоянным и равным 20 мм. При такой длине разрядного промежутка поле между шарами $d_{шара} = 50$ мм можно считать равномерным. Диаметр шаров оставался постоянным, изменялись только размеры острия. Напряжение измерялось шаровыми разрядниками.

На фиг. 2 изображена зависимость разрядного напряжения от длины острия для различных диаметров проволоки на постоянном напряжении. Для сравнения приведены зависимости Шайбе для одинаковых диаметров проволоки. Из наших опытов следует, что на величину разрядного напряжения большее влияние оказывает длина острия, нежели его диаметр. С уменьшением диаметра проволоки влияние полярности острия на величину разрядного напряжения меньше. Пробою промежутка предшествует образование короны вокруг острия. Напряжение начала коронирования определялось визуально и на слух. С увеличением длины острия от 0,5 мм до 15 мм напряжение начала коронирования уменьшается соответственно с $0,73 U_{пр макс}$ до $0,44 U_{пр макс}$. Зависимость напряжения начала коронирования от длины острия представлена на фиг. 3.

Производилось исследование влияния нарушений поверхности электрода на разрядное напряжение на импульсах. Из опытов по исследованию распределения падения напряжения на импульсах в межэлектродном промежутке, любезно предоставленных В. С. Дмитриевским, известно, что наибольшее падение напряжения приходится на область вблизи высоковольтного электрода, если электроды симметричные. Нарушение поля посторонним предметом в этой области приведет к разряду при меньшем напряжении, чем при нарушении других областей межэлектродного промежутка. Если острие находится на заземленном электроде, то увеличение напряженности поля вблизи заземленного электрода меньше, чем в том случае, когда острие находится на высоковольтном электроде, поэтому при заземленном острие разрядное напряжение выше, чем при незаземленном.



Фиг. 3. Зависимость пробивного напряжения от величины острия на поверхности электрода. Напряжение импульсное.

1—проволока диаметром 0,07 мм; острие (-). 2—проволока диаметром 0,18 мм; 0,38 мм; острие (-). 3—проволока диаметром 0,07 мм; 0,18 мм; 0,38 мм; острие (+). 4—напряжение начала коронирования для острия (-). 5—напряжение начала коронирования для острия (+).

На фиг. 3 изображена зависимость величины разрядного напряжения от длины острия для различных диаметров проволоки на импульсном напряжении. Разность в разрядных напряжениях при различной полярности острия на импульсах во много раз больше, чем на постоянном напряжении. Чем тоньше проволока, тем значительнее влияние полярности.

Из сопоставления результатов исследований на импульсах и постоянном напряжении (фиг. 2 и 3) видно, что разрядное напряжение при отрицательной полярности острия на импульсах на 25% выше, чем при постоянном напряжении (фиг. 4). Соответственно при положительной полярности острия—на 10—15%. Однако нельзя утверждать, что нарушение поверхности электрода не влияет на величину разрядного напряжения на импульсах. Как видно из фиг. 4, острие длиной 0,5 мм и диаметром 0,07 мм уже снижает разрядное импульсное напряжение на 10% в том случае, если острие отрицательное. Если острие положительное, то пробивное импульсное напряжение уменьшается больше чем на 40%. Утверждение о том, что ... „избегать острых углов, как это делается при нормальной частоте, в конструкциях импульсных генераторов не требуется, так как при импульсах острые кромки, углы и проч. обладают большим разрядным напряжением, чем закругленные части“, нашими опытами не подтверждено [2].

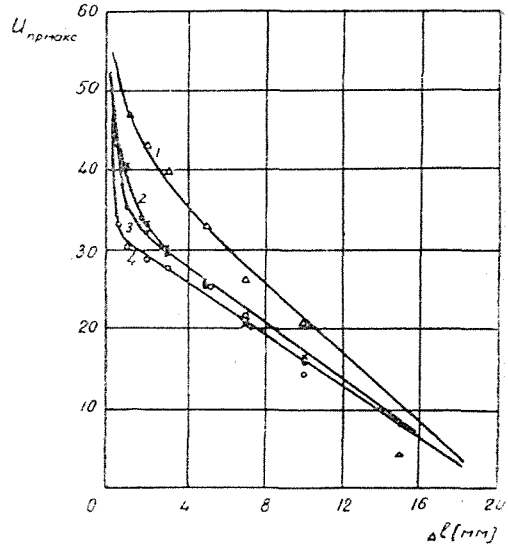
На фиг. 5 представлена зависимость разрядного импульсного напряжения от величины емкости в „ударе“ для острия положительной поляр-

ности определенной длины (6 мм). С увеличением емкости в „ударе“ разрядное напряжение понижается, и величина энергии, поступающей в промежутки и равная

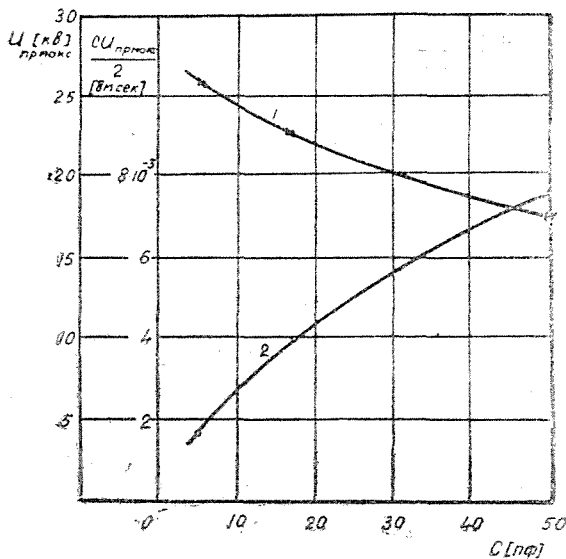
$$W_{раз} = \frac{CU_{пр. макс}^2}{2} \text{ вт сек,}$$

Фиг. 4. Сравнение результатов исследований на постоянном и импульсном напряжениях. Проволока диаметром 0,07 мм.

- 1, 4—напряжение импульсное.
- 2, 3—напряжение постоянное.



увеличивается, так как при увеличении емкости в „ударе“ в 3 раза пробивное напряжение уменьшается всего на 12%. Для острия отрицательной полярности влияние емкости в „ударе“ меньше.



Фиг. 5. Зависимость пробивного напряжения на импульсах от величины емкости в „ударе“.

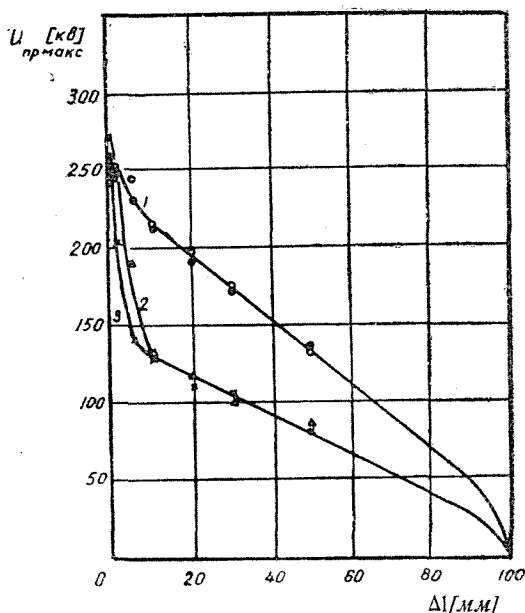
C—емкость в „ударе“.

1—зависимость пробивного напряжения от величины емкости в „ударе“.

2—зависимость энергии $\frac{CU_{пр. макс}^2}{2}$, поступившей в промежуток от величины емкости в „ударе“.

Проделаны опыты по перекрытию больших межэлектродных расстояний до 100 мм в воздухе (фиг. 6). В качестве электродов использовались плоскости с закругленными краями. Зависимость разрядного напряжения от величины нарушающего выступа (острия из проволоки) не отличается от зависимостей, полученных для малых межэлектродных расстояний. На

фиг. 6 представлена зависимость разрядного напряжения от длины острия при различной полярности импульса. Влияние полярности импульса при остриях небольших размеров (3—5 мм) значительно и при этом доходит до 25%.



Фиг. 6. Зависимость пробивного напряжения от полярности импульса.
1, 2—положительный импульс.
3, 4—отрицательный импульс.

На основании наших опытных данных подсчитан средний и максимальный разрядные градиенты потенциала для острий различных размеров при разряде при постоянном и импульсном напряжениях. Средний и максимальный градиенты напряжения определялись как отношение

$$E = \frac{U_{\text{пр. макс}}}{S} \frac{\text{кВ}}{\text{см}},$$

где $U_{\text{пр. макс}}$ — разрядное напряжение, S — расстояние между концом острия и шаром, а также как касательная к кривой зависимости разрядного напряжения от длины острия. Средний расчетный градиент мало зависит от вида напряжения (постоянное, переменное, импульсное) и не зависит от длины острия (а следовательно, и от длины промежутка), за исключением очень малых длин (до 1,5 мм), при которых он увеличивается примерно на 10%.

На фиг. 7 дана зависимость среднего и максимального расчетных градиентов от диаметра проволоки. Как видно из графика, средний разрядный градиент при отрицательной полярности острия на 25% ниже разрядного градиента равномерного поля. С увеличением диаметра проволоки средний и максимальный разрядные градиенты напряжения уменьшаются. Исключение представляет зависимость максимального градиента от диаметра проволоки при положительной полярности острия, которая, вероятно, возрастает до определенного предела и затем, очевидно, будет уменьшаться.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что нарушение поверхности электрода в виде острых выступов или острий с соотношением диаметра острия к диаметру шара от 0,0014 до 0,016 снижает разрядное напряжение в воздухе. Поэтому поверхности высоковольтных конструкций следует тщательно шлифовать и избегать острых выступов.

В заключение считаю своим долгом выразить благодарность руководителю работы профессору доктору Воробьеву А. А. за предложение темы, ценные указания и критические замечания при ее выполнении.

Фиг. 7. Средний и максимальный расчетные градиенты потенциала в зависимости от диаметра проволоки.

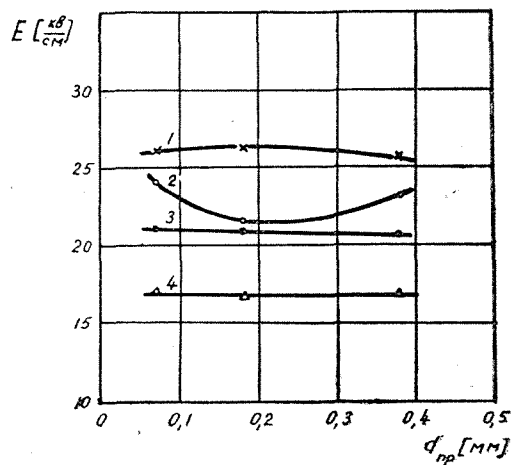
E —градиент напряжения.

1—максимальный градиент; острие (—).

2—максимальный градиент; острие (+).

3—средний градиент; острие (—).

4—средний градиент; острие (+).



ЛИТЕРАТУРА

1. Kossel W. Bemerkungen über elektrostatische Maschinen. Zeit. für Physik, 1938—1939, Bd. 111, Heft 3—4, s. 264—280, mit 9 Fig.
2. Под редакцией проф. Залесского А. М. Руководство к работам в лаборатории высокого напряжения. ОНТИ, Кубуч, 1934.
3. Воробьев А. А. Техника высоких напряжений. ГЭИ, 1945.
4. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества. ГИТТЛ, 1949.