

## ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРИТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КОРОНЫ НА ПРОВОДАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДОЖДЕМ

Н. Б. БОГДАНОВА

### Введение

Изучение изменения критического напряжения короны, тока и потерь в непогоду, т. е. в связи с изменением влажности воздуха и наличием на коронирующих проводах осадков, представляет значительный интерес. Следует ожидать, что критическое напряжение короны  $U_{кр}$  будет ниже на покрытых осадками проводах вследствие появления на поверхности проводов дополнительных острий в виде капель воды, крупниц льда и т. д.<sup>1)</sup> Влажность воздуха также может оказать влияние на величину  $U_{кр}$ . Исследование этого вопроса [7], [8] показало, что начальное напряжение в атмосфере водяного пара отличается от такового в воздухе и, например, для симметричных электродов оказалось на 16% выше. По данным исследователей короны переменного тока [1], [9] и др., влажность воздуха сама по себе, при условии сухой поверхности проводов, не оказывает влияния на величину критического напряжения короны.

Ток и потери мощности на корону на проводах, находящихся под дождем, в атмосфере тумана, в условиях обледенения, должны измениться по сравнению с током и потерями, измеренными в нормальных условиях, во-первых, вследствие указанного выше изменения критического напряжения короны  $U_{кр}$ , во-вторых, вследствие изменения подвижности ионов воздуха.

Из исследований Жебровского [2] с трубчатым электрофильтром (при постоянном токе) можно заключить, что увеличение влажности воздуха вызывает уменьшение тока короны. Это и следует ожидать, так как увеличение влажности воздуха приводит к уменьшению подвижности ионов воздуха, следовательно, и к уменьшению тока. С другой стороны, по мнению Пика и др. [1, 9], влажность воздуха, не оказывая влияния на  $U_{кр}$ , не изменяет также и величину потерь мощности на корону переменного тока  $P$ .

По данным этих же авторов, потери  $P$  значительно увеличиваются при наличии осадков на проводах вследствие уменьшения критического напряжения до величины

$$U''_{кр} = m_{пog} U_{кр},$$

где  $m_{пog} \leq 1$  — коэффициент погоды.

Нужно заметить, что в технических расчетах потерь на корону на линиях передач высокого напряжения, производящихся по эмпирической формуле Пика,

$$P = C(U - m_{пog} U_{кр})^2,$$

<sup>1)</sup> При обледенении критическое напряжение короны может быть даже выше, чем в нормальных условиях, благодаря увеличению диаметра провода.

коэффициент погоды считается равным единице только в солнечную погоду. Тем самым молчаливо предполагается, вопреки высказываниям самого Пика, что при пасмурной погоде, но в отсутствии осадков критическое напряжение уменьшается, а потери увеличиваются. Увеличение тока короны на покрытых осадками проводах отмечалось также в работах Штригеля [10]. С другой стороны, Кюн [11] в опытах с короной постоянного тока обнаружил независимость величины тока короны от того, покрыты провода осадками или нет.

Целью настоящей работы является исследование влияния влажности воздуха и осадков на провода на технические характеристики короны постоянного тока—критическое напряжение и ток, т. е. выяснение следующих вопросов: 1) изменяется ли критическое напряжение короны на проводах, находящихся во влажном воздухе, если поверхность проводов остается сухой; 2) как меняется критическое напряжение при наличии осадков на проводах; 3) каков ход вольтамперных характеристик короны в случае, когда провода коронируют во влажной атмосфере и поверхность их остается сухой; 4) когда на поверхности проводов осаждаются капли.

Измерения проводились при коронировании провода, помещенного внутри коаксиального ему цилиндра, провода, помещенного против плоскости и на двух параллельных проводах. Подробнее об экспериментальных установках см. в предыдущем сообщении [3]. Во всех опытах принимались меры для экранирования изоляторов от попадания на них влаги: измеренные токи утечки во время дождя оказались ничтожными и в общем равными токам утечки в нормальных условиях. Отсутствие краевого эффекта проверялось для всех установок. Пульверизатор, наполняемый дистиллированной водой, сообщался с воздуходувкой через тройник, что позволяло в некоторых пределах менять силу дождя; во всех опытах она не превышала 1 мм/мин.

Ранее было показано [3,4], что по мере возрастания напряжения над критическим напряжением коронирования влага все в меньших количествах осаждается на проводах и при некоторых напряжениях  $U_c$  провода остаются сухими, находясь под дождем. Это дает возможность при  $U \geq U_c$  исследовать коронирование проводов во влажной атмосфере, но в отсутствии осадков на них; при  $U < U_c$  выпавшие на проводах осадки и влажность воздуха совокупно влияют на величину тока и критического напряжения короны. При этом влажность воздуха и в том и в другом случае остается одной и той же.

### Вольтамперные характеристики коронного разряда

Для выяснения влияния осадков на величину тока короны были произведены следующие опыты. Провода находились в течение некоторого времени под дождем. Затем дождь прекращался, включалось постоянное напряжение  $U$ , несколько превышающее  $U_{кр}$ . Провода постепенно высыхали. При этом фиксировалось количество капель в поле зрения зрительной трубы, направленной на провода, и ток короны  $I$ . На рис. 1 приведены результаты подобного опыта для параллельных проводов: по мере высыхания проводов, с уменьшением числа капель  $n$  ток короны  $I$  уменьшался, при  $n = 0$   $I = I_0$ —току, измеренному ранее в отсутствии дождя.

На рис. 2, 3 и 4 приведены типичные вольтамперные характеристики коронного разряда (сплошные кривые—измеренные при нормальных условиях, пунктирные—при дожде). Рис. 2 относится к случаю коронирования провода внутри коаксиального ему цилиндра (провод диаметром  $2r_0 = 2,3$  мм находится при отрицательной полярности по отношению к цилиндру). Ток короны  $I$ , измеренный при дожде при малых напряжениях, больше тока  $I_0$ , измеренного в нормальных условиях. По мере увеличе-

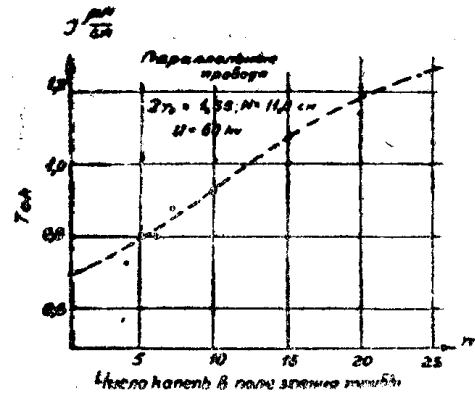


Рис. 1. Зависимость величины тока короны от количества капель на поверхности проводов.

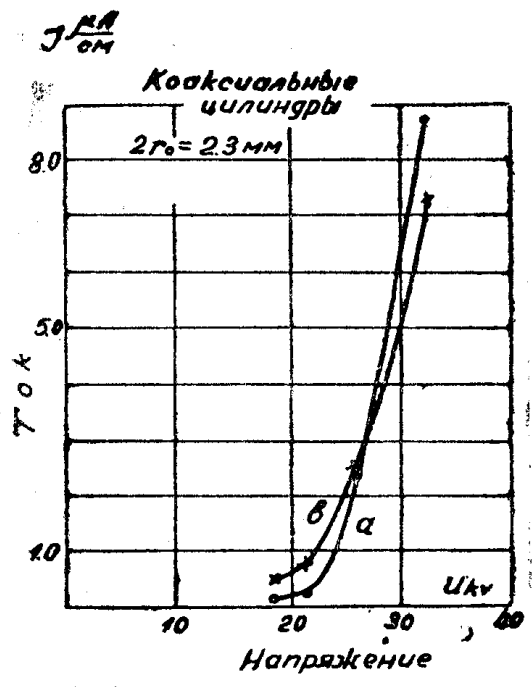


Рис. 2. Вольтамперные характеристики коронного разряда. Провод помещен внутри коаксиального ему цилиндра.

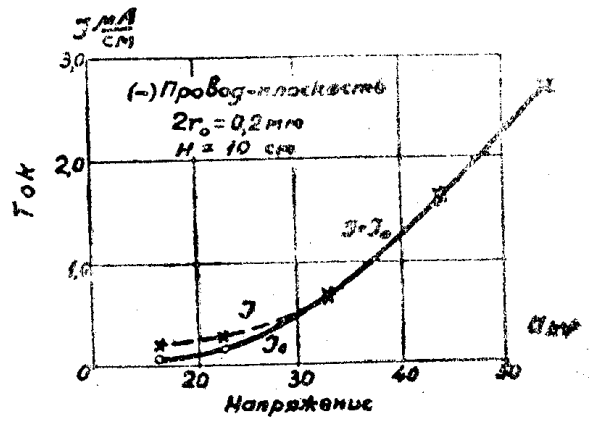


Рис. 3. Вольтамперные характеристики коронного разряда. Провод помещен против плоскости.

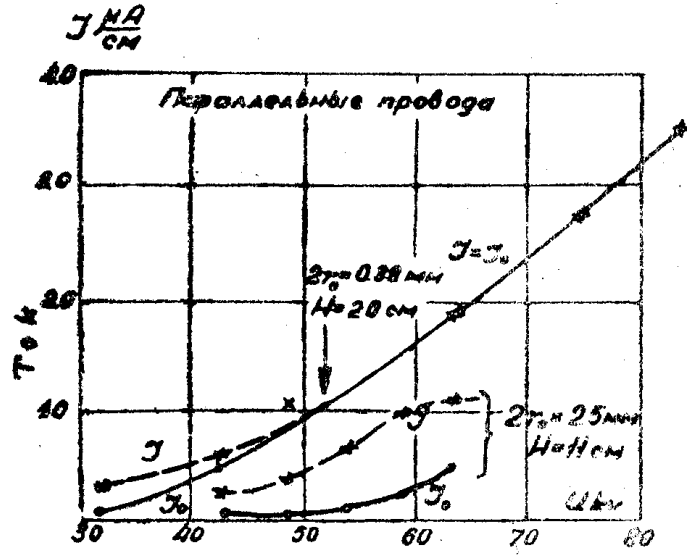


Рис. 4. Вольтамперные характеристики коронного разряда. Параллельные провода.

ния напряжения,  $I$  стремится к  $I_0$  и затем делается меньше  $I_0$  (начиная с некоторых напряжений отношение  $\frac{I}{I_0}$  делается постоянным, равным, примерно, 0.7—0.8).

Несколько иной ход у вольтамперных характеристик разряда в случае коронирования провода против плоскости (рис. 3) и в случае параллельных проводов (рис. 4). По мере увеличения напряжения ток  $I$  приближается по своим значениям к току  $I_0$ , в некоторых случаях делается равным ему (рис. 3 и верхняя кривая рис. 4), но не делается меньше  $I_0$ . Многочисленные опыты показали, что при том напряжении, при котором

1) в коаксиальных цилиндрах отношение  $\frac{I}{I_0}$  делается равным постоянному дробному числу (0.7—0.8); 2) в двух других случаях  $I \approx I_0$ , визуальные, фотографические и иные наблюдения не обнаруживали на проводах осад-

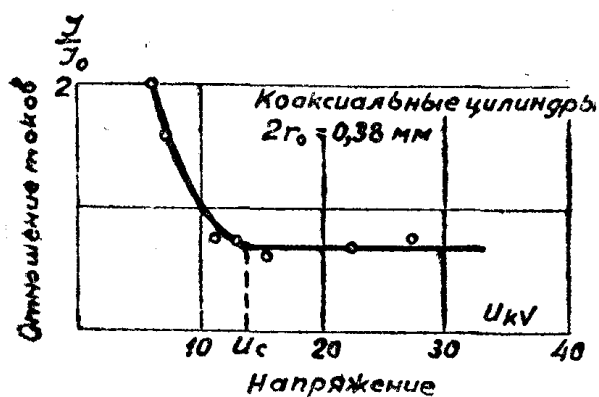


Рис. 5. Зависимость относительного изменения тока короны от напряжения для случая провода, помещенного внутри цилиндра.

ков. Это напряжение мы и определили, как напряжение  $U_c$ , при котором коронирующие провода остаются сухими, находясь под дождем.

При напряжениях  $U$ , лежащих в пределах между  $U_{кр}$  и  $U_c$ , влага осаждается на проводах. При этом ток должен быть больше, чем при измерении в отсутствие дождя (рис. 1), что и наблюдается—см. вольтамперные кривые рис. 2, 3 и 4. С увеличением напряжения капли осаждаются все в меньшем количестве—ток  $I$  приближается к значениям тока  $I_0$ . Нужно заметить,

что даже небольшого количества осадков на проводах достаточно для того, чтобы  $I$  не равнялась  $I_0$  (провод—плоскость и параллельные провода). Можно, таким образом, констатировать, что осадки на проводах, несомненно, приводят к увеличению тока короны во всех рассмотренных случаях.

При  $U > U_c$  ток  $I$  может отличаться от  $I_0$  только лишь по причине влияния влажности воздуха на ток или изменения  $U_{кр}$ . Если считать, что  $U_{кр}$  не изменяется (а мы увидим в дальнейшем, что это справедливо), то можно ожидать уменьшения тока короны вследствие уменьшения подвижности ионов. Такой эффект наблюдался нами только лишь в случае коронирования провода внутри коаксиального ему цилиндра (рис. 5, при  $U > U_c, \frac{I}{I_0} = 0.8$ ). В двух других случаях влияние влажности воздуха, видимо, мало, по крайней мере мы ни разу не зафиксировали токи меньшие чем  $I_0$ , при  $U > U_c, I = I_0$ .

### Критическое напряжение короны

Критическое напряжение короны  $U_{кр}$  в отсутствие дождя определяется из прямых редуцированных характеристик

$$\frac{I}{U} = A(U - U_{кр})^2$$

1) В свете последних работ такое построение для биполярной короны (два параллельных провода) является не вполне законным, и зависимость тока от напряжения имеет более сложный вид [5].

Воспользовавшись тем обстоятельством, что при  $U > U_c$  провод остается сухим, находясь под дождем, можем определить критическое напряжение коронирования во влажной атмосфере  $U'_{кр}$ , при условии сухой поверхности проводов. Для этого строим редуцированную характеристику такого „осушенного“ коронного провода; в координатах  $\frac{I}{U}$ ,  $U$  наносим точки,

соответствующие  $U > U_c$  и, продолжая получившуюся прямую до пересечения с осью  $U$ , определяем  $U'_{кр}$  во влажной атмосфере, как отрезок, отсекаемый на оси  $U$ . Такие построения выполнены на рис. 6 для провода, коронирующего внутри цилиндра (диаметр провода 0,38 мм)—прямая  $b$ ; прямая  $a$ —представляет собой редуцированную характеристику короны в нормальных условиях. Из рисунка следует, что  $U'_{кр} = U_{кр}$ . Продолжая такие же построения для большого количества других случаев, мы неизменно приходим к тому же выводу. Для случая провода, помещенного против плоскости и параллельных проводов, такие построения излишни, ибо при  $U > U_c$ ,  $I = I_0$ , прямые редуцированных характеристик совмещаются,  $U'_{кр} = U_{кр}$ .

Для подтверждения этого же положения мы построили редуцированные характеристики коронного разряда в трубчатом электрофилтре при различной влажности воздуха по данным Жебровского [2] (рис. 7). На

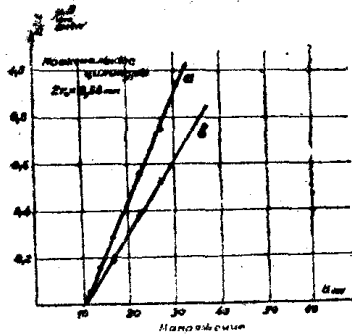


Рис. 6. Прямые редуцированных характеристик короны для случая провода, помещенного внутри цилиндра.

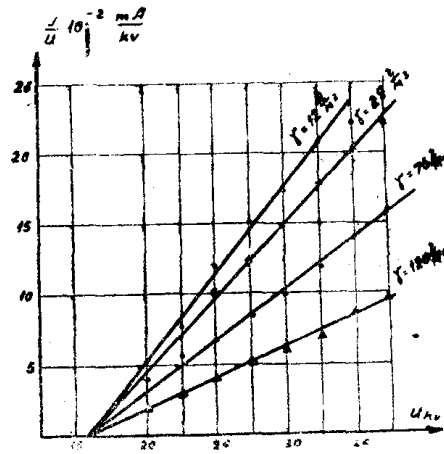


Рис. 7. Прямые редуцированных характеристик коронного разряда в трубчатом электрофилтре при различных влажностях воздуха (по данным Жебровского).

основании этих данных, можно также заключить о неизменности величины критического напряжения короны при изменении влажности воздуха в довольно широком диапазоне. Заметим, что в наших опытах в окружающей провода атмосфере не только было повышенное количество водяных паров, но все пространство было заполнено водяными каплями (дождь продолжался!). Следовательно, и дождь сам по себе, при условии сухой поверхности проводов, не изменяет величины критического напряжения короны.

Обратимся теперь к опытам, в которых, в отличие от только что рассмотренных, влага осаждалась на проводах. Критическое напряжение короны в этих условиях— $U''_{кр} = m_{пog} U_{кр}$ . Величину коэффициента погоды мы также находили из редуцированных характеристик [6]. Коэффициент погоды при одних и тех же „метеорологических условиях“ (сила дождя) оказался в очень сильной степени зависящим от диаметра провода и от ве-

личины приложенного напряжения. В случае проводов больших сечений (2.5 мм) значения коэффициента погоды  $m_{\text{пог}}$  спускались до 0.5.

По мере увеличения напряжения, коэффициент погоды приближался по своим значениям к единице, при тех напряжениях, при которых провод оставался сухим, находится под дождем ( $U \geq U_c$ )  $m_{\text{пог}} = 1$ .

В опытах на переменном напряжении мы наблюдали изменение знака выпрямления короны в тех случаях, когда на проводе осаждались капли; при увеличении напряжения, по мере уменьшения количества влаги на поверхности проводов, ток вновь менял свое направление на первоначальное—то, которое было в отсутствии дождя.

### Заключение

Показано, что ток короны при наличии осадков на проводах больше тока, измеренного в нормальных условиях; увеличение количества влаги на проводах приводит к увеличению тока и наоборот. Ток короны во влажной атмосфере, но в отсутствии осадков на проводах либо меньше (наши опыты с коаксиальными цилиндрами и опыты Жебровского), либо близки (наши опыты с параллельными проводами и проводом, расположенным против плоскости) к значениям тока, измеренного в нормальных условиях. Если влага на проводах не осаждается, ток короны может измениться вследствие уменьшения подвижности ионов во влажном воздухе. Нет ничего удивительного в том, что это изменение существенно для закрытого пространства коаксиальных цилиндров и незаметно для открытого пространства двух других конструкций.

Критическое напряжение короны зависит только от состояния поверхности проводов и не зависит от влажности воздуха. Это дает основание считать коэффициент погоды равным единице не только в солнечную погоду; при пасмурной погоде, при которой однако поверхность проводов остается сухой, коэффициент погоды также следует считать равным единице. Это даст возможность исходить при техническом расчете не из числа среднегодовых солнечных дней, а из числа среднегодовых дней с отсутствующими осадками.

В заключение приношу глубокую благодарность профессору-доктору А. А. Воробьеву за ценные советы и указания.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Пик.—Диэлектрические явления в технике высоких напряжений\*, ОНТИ, 1934.
2. С. П. Жебровский—Электричество, № 24, 1936.
3. А. А. Воробьев и Н. Б. Богданова—Известия ТПИ, 1948.
4. А. А. Воробьев и Н. Б. Богданова—ЖТФ, 1948.
5. В. И. Полюков—ДАН, т. LVIII, № 5, 1947.
6. Н. Б. Богданова—Известия ТПИ, 1948.
7. S. Frank-Z. f. Phys. H. 5—6, 409, 1931.
8. E. Weichelt-Phys. Z. 32, N 4, 1931.
9. I. S. Carroll a. M. M. Rockwell-El. Eng. v. 56, N 5, 1937.
10. R. Striegel-Wissenschaftliche Veröffentlich. aus d. Siemens Werken. B. XV, H 1, S. 68, 1936.
11. E. Kühn-E.T.Z. H. 22, 1935.