

- [4] Фрейк Д.М., Салий Я.П., Межилов - ская Л.И., Собкович Р.И., Школьный А.К., Огородник Я.В. // ФТП. 1989. Т. 23. № 6. С. 710-714.
- [5] Зломанов В.П., Новоселова А.В. Р-Т-х диаграммы двухкомпонентных систем. М.: Наука, 1980. 120 с.
- [6] Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. 360 с.
- [7] Kotai E., Parsiti F., Manuaba A., Mezeu G. and al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1987. В. 19/20. Р. 312-317.

Поступило в Редакцию  
29 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 23

12 декабря 1989 г.

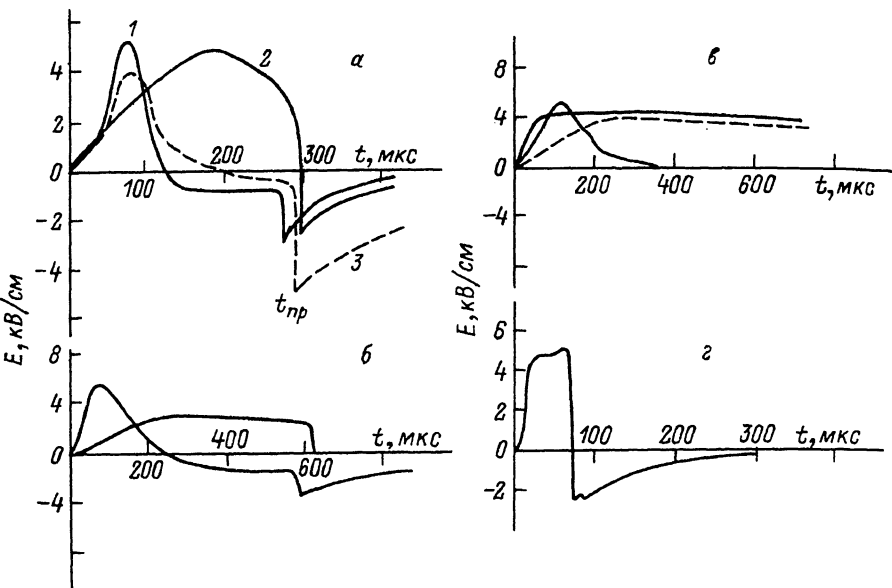
04; 07

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ДЛИННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОВОДНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

В.В. Куцаенко, А.В. Лупейко,  
Н.И. Петров, Е.Н. Чернов

Приводятся результаты экспериментального исследования искрового разряда в длинных воздушных промежутках с помощью оптического датчика напряженности электрического поля. Для измерения напряженности электрического поля, искаженного пространственным зарядом, используются различные устройства, в частности, емкостные датчики [1] и флюксометры [2]. Однако наличие проводящих частей в этих датчиках искажает измеряемое поле. Известен также оптический метод, основанный на эффекте Поккельса, который был применен для измерения электрического поля искрового разряда в воздушных промежутках длиной 1 и 3 м при положительной полярности воздействующего напряжения [3]. Было показано, что максимальное значение электрического поля достигается на конце стримерной зоны и равняется  $8 \div 14$  кВ/см, в чехле канала лидера напряженность электрического поля составляла 1-5 кВ/см. Отметим, что измерения электрического поля после пробоя промежутка в [3] не проводились.

В настоящей работе аналогичный датчик используется для измерения напряженности электрического поля, искаженного пространственным зарядом стримерной зоны и канала лидера, в воздушных промежутках длиной от 4-х до 20 метров при воздействии аперiodических импульсов напряжения положительной полярности с соотношениями длительностей фронта и импульса  $\tau_{ф}/\tau_{и} = 300/7500$  и  $15/7500$  мкс. Получен ряд качественно новых результатов, отсутствовавших в [3].



Осциллограммы напряженности электрического поля  $E$ . а, б, в -  $\tau_{\phi}/\tau_{\psi} = 300/7500$  мкс; г -  $\tau_{\phi}/\tau_{\psi} = 15/7500$  мкс; а -  $d = 6$  м: 1 -  $h = 0.6$  м, 2 -  $h = 2$  м, 3 -  $h = 0.4$  м; б -  $d = 12$  м: 1 -  $h = 0.8$  м, 2 -  $h = 4$  м; в -  $d = 18$  м: 1 -  $h = 4$  м, 2 -  $h = 0.8$  м, 3 -  $h = 1.6$  м, г -  $d = 6$  м: 1 -  $h = 3$  м.

Датчик представляет собой первичный преобразователь, оптически связанный волоконными световодами с источником света и фотоприемником [4]. Длина волоконно-оптического тракта около 150 м. Источник света - полупроводниковый светодиод с длиной волны излучения 0.86 мкм. Порог чувствительности датчика 0.05 кВ/см, полоса регистрируемых частот 50 МГц.

Измерения проводились в промежутке стержень-плоскость.

Импульсы напряжения формировались на выходе генератора импульсных напряжений ГИН-9МВ наружной установки [5]. Датчик располагался в воздушном промежутке на различных расстояниях  $h$  от конца стержня как внутри стримерной зоны, так и вне ее. Длина стримерной зоны  $l_{стр}$  измерялась по фотохронограммам фотоэлектронного регистратора ФЭР-14, разработанного в ВНИИОФИ. Синхронно с измерениями электрического поля измерялось также напряжение в промежутке с помощью встроенного в ГИН делителя.

Осциллограммы изменения напряженности электрического поля в зависимости от времени при воздействии импульсов напряжения положительной полярности представлены на рисунке. Рисунки, а, б со-

ответствуют измерению электрического поля в промежутке длиной  $d = 6$  м и  $d = 12$  м в случае пробоя при воздействии импульса напряжения с соотношением длительностей фронта и импульса  $\tau_f/\tau_u = 300/7500$  мкс. Максимальное значение напряженности электрического поля достигается при прохождении стримерной зоны лидера через датчик и равняется 4–6 кВ/см, причем момент достижения этого максимума для различных положений датчика в промежутке определяется скоростью распространения лидера. Кривые 1 соответствуют случаю прохождения стримерной зоны через датчик. Из рисунков видно, что в этом случае изменяется полярность напряженности электрического поля, причем в осциллограммах можно выделить две стадии, соответствующие различным физическим процессам. Первая соответствует лидерной стадии развития разряда, вторая – нейтрализации зарядов или стадии обратного удара. Время формирования разряда растет с увеличением длины промежутка  $d$  и определяется скоростью распространения лидера ( $t_{пр} \approx d/v_A$ ). После пробоя напряженность поля плавно падает. Время полуспада или время нейтрализации пространственного заряда  $t_H$  растет с увеличением длины промежутка. Так, при длине промежутка  $d = 6$  м время  $t_H \approx 100$  мкс, а при  $d = 12$  м –  $t_H \approx 400$  мкс. В случае, когда датчик оказывается за пределами чехла лидера, стадия нейтрализации датчиком не регистрируется (см. рисунок, б; кривая 2).

При отсутствии пробоя осциллограмма поля изменялась в зависимости от наличия или отсутствия в промежутке незавершенного лидера (см. рисунок, в). В последнем случае датчик, расположенный за пределами стримерной короны от конца стержня, воспроизводил изменение поля электродов в промежутке стержень–плоскость (см. рисунок, в; кривая 1). Внутри стримерной короны при отсутствии лидера электрическое поле повторяет форму воздействующего напряжения, однако скорость роста поля определяется не крутизной подъема напряжения, а динамикой пространственного заряда в стримерной зоне и зависит от расстояния от конца стержня (см. рисунок, в; кривая 2). При наличии в промежутке незавершенного лидера изменение поля внутри стримерной короны происходит аналогично случаю пробоя. Однако изменение полярности поля при этом не наблюдается (см. рисунок, в; кривая 3).

Представляет интерес измерение поля искрового разряда при отсутствии составляющей поля электродов. Такое измерение возможно благодаря тому, что датчик регистрирует лишь составляющую поля, направленную вдоль оси чувствительного элемента. Поэтому при горизонтальном расположении датчика под стержнем на осевой линии промежутка поле электродов не регистрируется. Осциллограмма поля в этом случае приводится на рисунке, а (кривая 3). Электрическое поле электродов сильно уменьшается также при удалении от конца стержня и становится существенно меньше по сравнению с полем пространственного заряда в стримерной зоне. Поэтому изменение поля, регистрируемое датчиком вдали от стержня, обуславливается пространственным зарядом стримерной зоны и канала лидера (см. рисунок, а, кривая 2).

Изменение длительности фронта действующего напряжения ( $\tau_{\phi} = 15$  мкс) на качественной картине поведения поля не сказывается. Отметим лишь, что время формирования пробоя существенно уменьшилось из-за увеличения скорости распространения лидера и увеличения длины стримерной зоны в финальной стадии (см. рисунок, г).

Таким образом, полученные результаты показывают, что на изменение во время напряженности электрического поля искрового разряда определяющее влияние оказывает пространственный заряд стримерной зоны и канала лидера. Характерной особенностью поведения электрического поля в чехле канала лидера при пробое является изменение его полярности. Время нейтрализации пространственного заряда растет с увеличением длины промежутка или радиуса чехла канала лидера. Максимальное значение электрического поля достигается в стримерной зоне лидера и составляет 4–6 кВ/см.

В заключение авторы выражают благодарность В.Р. Аванскому, Г.И. Алексюткину и В.М. Кудрякову за помощь в проведении экспериментов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б а з е л я н Э.М. // ЖТФ. 1964. Т. 34. № 36. С. 474–483.
- [2] W a t e r s R.T. // J. Phys. E. 1972. V. 5. P. 475–478.
- [3] Н и д а к а К., М и р о о к а Y. // IEEE Proc. 1985. V. 132. Pt. A. N 3. P. 139–146.
- [4] Горчаков В.К., Куцаенко В.В., Потанов В.Т. // Радиотехника. 1988. № 8. С. 28–31.
- [5] Чернов Е.Н. Генератор импульсных напряжений 9-МВ наружной установки. Материалы Всес. н.-т. конф. „Ленинский план электрификации СССР в действии“. М., 1981. С. 15.

Всесоюзный электротехнический институт им. В.И. Ленина

Поступило в Редакцию  
15 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 23

12 декабря 1989 г.

04

#### МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ВОДЕ

Н.И. К у с к о в а

Ранее было показано, что развитие наносекундного разряда в воде связано с термополевой диссоциацией (эффектом Френкеля) при максимальных напряженностях поля  $E \approx 10^9$  В/м [1, 2].