

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ИСКРЫ В ВОЗДУХЕ

С. И. Андреев, Е. А. Зобов, А. Н. Сидоров

(Ленинград)

Скользящие искры возникают на поверхности диэлектрика, под слоем которого имеется проводник [1]. Особенно легко они появляются, если этот проводник (в дальнейшем его будем называть инициатором) соединен электрически с одним из электродов.

Изучению скользящих искр посвящена обширная литература (например, [1—8]). В основном изучались условия возникновения таких разрядов в технике высоких напряжений. Вопросы динамики развития исследовались в работах [7, 8]. Эти исследования относятся к области сравнительно малых промежутков ($l \leq 0,24$ м).

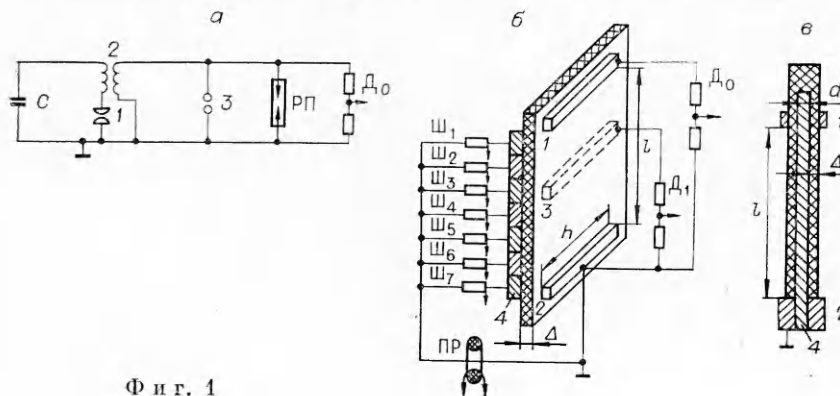
Данная работа посвящена исследованию физических процессов развития скользящих искр от коротких до длинных (8 м) промежутков.

Методика эксперимента. Скользящие искры возникали на поверхности тонкопленочных диэлектриков, которые покрывали либо плоские металлические поверхности, либо трубы. В работе использовалось напряжение, образующееся при разряде конденсатора емкостью $C = 0,5—16$ мкФ (фиг. 1, а) через управляемый разрядник 1 на первичную обмотку (один виток) кабельного трансформатора 2. На вторичной обмотке (десять витков) возникало напряжение в виде затухающей косинусоиды с периодом от 2 до 18 мкс (логарифмический декремент затухания $\sim 0,01$). Это напряжение прикладывалось к электродам исследуемого разрядного промежутка (РП). Оно осциллографировалось с помощью делителя D_0 . Максимальное значение определялось с помощью шаров 3 диаметром 380 мм (градуировочные таблицы взяты из [5]).

Измерялось распределение токов по длине канала (фиг. 1, б). Для этого инициатор 4 был изготовлен из изолированных друг от друга плоских металлических пластин. Токовые шунты Ш позволяли осциллографировать ток через каждую из пластин. Пояс Роговского (ПР) измерял общий ток. Инициатор соединялся с заземленным электродом 2. Разряд всегда начинался со стороны высоковольтного электрода 1.

Распределение напряжения по длине промежутка измерялось зондирующим электродом 3 и делителем напряжения D_1 (фиг. 1, б).

Развитие тела свечения канала разряда регистрировалось с помощью скоростного фоторегистратора (СФР). Развертка проводилась перпенди-



Ф и г. 1

кулярно оси канала. Исследовалось развитие канала на различных расстояниях от электродов. Принимались специальные меры для стабилизации канала в пространстве. Для этого на поверхность диэлектрика наносилась узкая (шириной 1 мм) управляющая полоса полистирольного лака со взвешенным в нем порошком окиси бария (95%) и графита (5%). Метод управления развитием скользящих искр рассмотрен в работе [9].

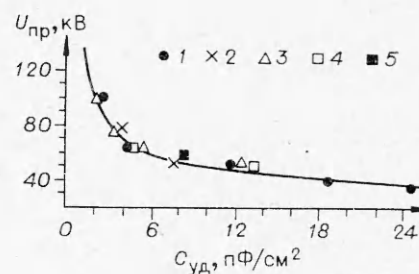
Длина разрядного промежутка l в плоской конструкции (см. фиг. 1, б) варьировалась от 12 до 140 см, и в цилиндрической (фиг. 1, в) — от 25 до 800 см. Ширина разрядного промежутка в плоской конструкции h составляла 12 или 32 см, в цилиндрической — πd , диаметр $d = 4$ см.

В работе использовались следующие диэлектрические пленки: полиэтилена (с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,2$), лавсана (полиэтилентерефталата, $\epsilon = 3,2$), триацетата целлюлозы ($\epsilon = 3,5$), фторопласта марки Ф23 ($\epsilon = 7,8$) и марки Ф26 ($\epsilon = 10,3$), листового винипласта ($\epsilon = 3,1$) и картона ($\epsilon = 4 + 6$). Толщина диэлектрических покрытий Δ варьировалась в широких пределах.

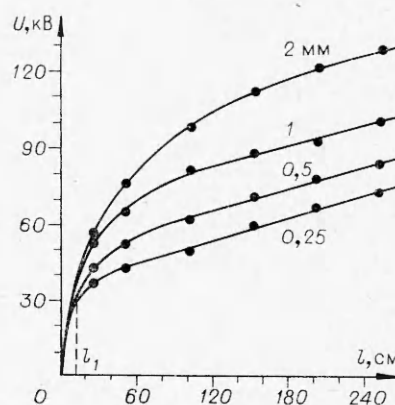
Пробойные характеристики. Минимальное напряжение, при котором возникает пробой, зависит в основном от l , Δ , ϵ [5]. Проведенные исследования пробойного напряжения $U_{пр}$ от параметров диэлектриков (фиг. 2) при большой длине промежутка ($l = 1$ м) показали, что существует зависимость от отношения ϵ/Δ , а не раздельно от ϵ и Δ . Различные точки на фиг. 2 получены путем использования диэлектрических материалов с различными значениями толщины Δ и диэлектрической постоянной ϵ (на фиг. 2 точки 1 получены для полиэтилена, 2 — лавсана, 3 — триацетата целлюлозы, 4 — фторопласта Ф23, 5 — фторопласта Ф26).

Таким образом, при пробое скользящей искрой длинных ($l \geq 1$ м) разрядных промежутков определяющим фактором является емкость диэлектрической пленки ($C_{уд} = 0,88 \epsilon/\Delta$ пФ/см², если Δ в миллиметрах), а влияние материала диэлектрика входит лишь через физическую величину ϵ . Особенно сильное влияние $C_{уд}$ на $U_{пр}$ имеет место в интервале изменения $C_{уд}$ от 0,5 до 5 пФ/см². Дальнейшее увеличение $C_{уд}$ (сверх 5 пФ/см²) не приводит к заметному уменьшению величины $U_{пр}$ (см. фиг. 2). Это можно объяснить тем, что рост емкостного тока, влияющего на проводимость канала, не приводит к уменьшению падения напряжения на канале. Это падение оказывается достаточно малым, и потенциал высоковольтного электрода с малыми потерями переносится в головку. В результате возникает самосогласованный режим, в котором напряженность электрического поля в головке поддерживается высокой в течение всего времени развития разряда. Величина $C_{уд}$, при которой возникает этот режим, определяет величину критической длины $l_{кр}$.

Рассмотрим теперь зависимость пробойного напряжения от длины (фиг. 3) (величина толщины диэлектрика в миллиметрах показана около кри-



Фиг. 2



Фиг. 3

вых, диэлектрическая постоянная $\varepsilon = 3,2-3,5$). Как видно из данных фиг. 3, кривую $U_{\text{пр}}(l)$ можно разбить на три участка.

Первый участок $l \leq l_1$ имеет величину пробойного напряжения, мало отличающуюся от соответствующей величины объемного пробоя газа в условиях острых электродов ($U_{\text{пр}}/l = E_1 = 300 + 350$ кВ/м). Влияние материала на этом участке отсутствует. Однако граница первого участка l_1 зависит от ε/Δ . Как показал анализ экспериментальных данных, длина промежутка, при котором пробой мало отличается от объемного, определяется формулой

$$l_1 \approx 0,045 C_{\text{уд}}^{-0,5} + 0,12 \text{ м}; U_{\text{пр}_1} = E_1 l$$

($C_{\text{уд}}$, пФ/см²).

Второй участок $l_1 \leq l \leq l_{\text{кр}}$ обычно исследуется в литературе по скользящим разрядам [1-8]. В наших условиях пробойное напряжение определяется формулой

$$U_{\text{пр}_2} = U_{\text{пр}_1} + (U_{\text{кр}} - U_{\text{пр}_1}) \sqrt{\frac{l - l_1}{l_{\text{кр}} - l_1}},$$

где $U_{\text{кр}}$ и $l_{\text{кр}}$ — значения пробойного напряжения и длины на границе перехода от второго участка к третьему. На кривой $U_{\text{пр}}(l)$ им соответствуют точки пересечения кривых с прямой линией. Экспериментально установлено, что $U_{\text{кр}}$ и $l_{\text{кр}}$ есть однозначные функции (для данной формы напряжения) от $C_{\text{уд}}$

$$l_{\text{кр}} = 1,8 C_{\text{уд}}^{-0,5} \text{ м}, U_{\text{кр}} = 130 C_{\text{уд}}^{-0,5} \text{ кВ},$$

если $C_{\text{уд}}$ в пФ/см².

Второй участок является переходной областью от разряда в объеме к «чисто» поверхностному разряду. Последний характеризуется определяющей ролью емкостного тока через инициатор. При переходе к «чисто» поверхностному разряду величина тока в канале растет, а сопротивление канала падает. Потенциал электрода при этом в значительной степени переносится в область головки канала, определяя интенсивность ионизационных процессов у головки. Существенным является то, что по мере развития канала разряда характер ионизационных процессов меняется слабо. Такое развитие самосогласовано: интенсивность ионизационных процессов определяется величиной потенциала в головке, а величина этого потенциала определяется проводимостью канала, зависящей от интенсивности ионизационных процессов. Определяющим параметром процесса в этом случае является напряженность поля в канале E_3 .

Пробойное напряжение в области третьего участка можно определить по формуле

$$(1) \quad U_{\text{пр}_3} \approx 1,1 [U_{\text{кр}} + E_3 (l - l_{\text{кр}})].$$

В условиях данного эксперимента $E_3 = 14 \pm 1,5$ кВ/м. Ошибка, которую дает формула (1), не превышает 15-20%, если $l \leq 6$ м. При $l > 6$ м величину E_3 следует брать 10 кВ/м.

Пробой промежутков большой длины при $U = U_{\text{пр}}$ происходит, как правило, в течение нескольких полупериодов во всем диапазоне использованных частот (30-300 кГц). Применение приведенных выше результатов при работе с незатухающим переменным напряжением в том же интервале частот не должно привести к заметным отличиям. Чтобы пробить промежу-



Ф и г. 4

ток за более короткое время, величину прикладываемого напряжения надо увеличить по сравнению с $U_{пр}$, определяемым по формуле (1).

Развитие пробоя. Если амплитуда приложенного напряжения равна $U_{пр}$, то пробой происходит, как правило, одним каналом, хотя в незавершенной стадии имеется несколько параллельно развивающихся каналов. При наличии перенапряжения пробой может произойти одновременно несколькими каналами. При росте перенапряжения число таких каналов растет и быстро достигает максимума. Критерии достижения максимального числа каналов различны при $l < l_{кр}$ и при $l > l_{кр}$. При $l < l_{кр}$ это число не зависит непосредственно от перенапряжения и однозначно определяется условием

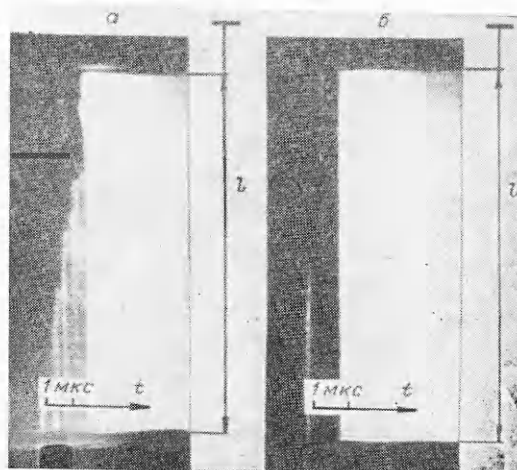
$$(2) \quad U = 1,3 U_{кр} \text{ при } l < l_{кр}.$$

При $l_1 \leq l \ll l_{кр}$ условие (2) соответствует большим перенапряжениям, а при $l \approx l_{кр}$ достаточно 30% перенапряжения. Эта же величина перенапряжения сохраняется и при $l > l_{кр}$

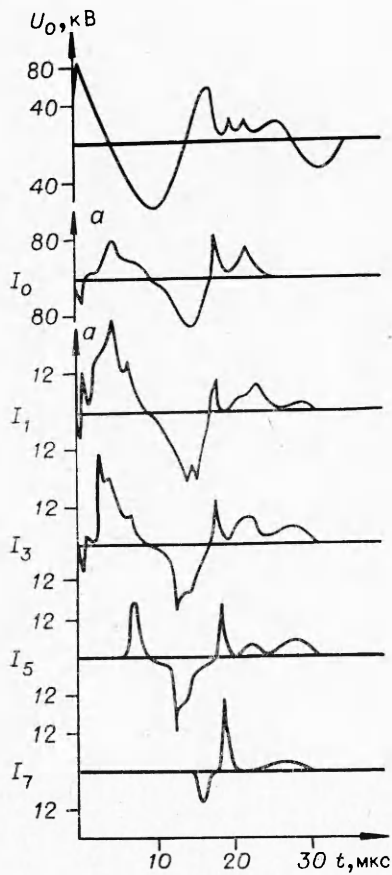
$$(3) \quad U = 1,3 U_{пр} \text{ при } l > l_{кр}.$$

Здесь $U_{пр} > U_{кр}$. Это связано с тем, что при $l > l_{кр}$ незавершенные каналы обладают высокой проводимостью и условие (3) требуется лишь для увеличения синхронности замыкания ими разрядного промежутка.

Интересно, что на мгновенную длину незавершенного канала определяющее влияние оказывает не поверхность «токсобора», а эффект подавления одного канала другим. На фиг. 4, а видно, что центральный канал задержал развитие соседних и «захватил» всю по-



Ф и г. 5



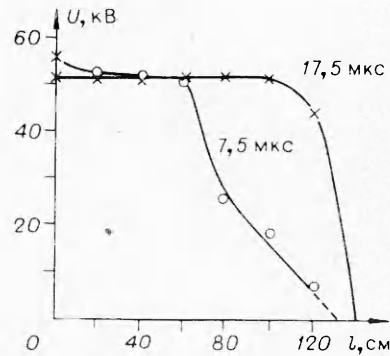
Ф и г. 6

индуктивного падения на внешней цепи. Поэтому слабо проводящий канал может «погаснуть» (см. фиг. 4, *в*). С этим связана зависимость $U_{пр}$ от ширины поверхности h , имеющая место при h (или πd) меньше 10 см.

Скорость развития канала непостоянна. Наблюдались паузы в развитии канала, связанные с колебаниями приложенного напряжения. На фиг. 5 приведены фоторазвертки лидерного канала при частотах 55 кГц (*а*) и 250 кГц (*б*). В кадре представлен весь промежуток длиной 40 см. Напряжение равно 60 кВ. Средняя скорость развития канала вдоль промежутка составляет $\sim 5 \cdot 10^7$ см/с, в то время как скорость между паузами по крайней мере на порядок выше. Наблюдались также паузы и в стадии роста напряжения [9]. Возникновение этих пауз связано, по нашему мнению, с неравномерным распределением проводимости по длине. В течение паузы более интенсивно остывают более нагретые участки канала и проводимость по длине выравнивается. Потенциал электрода переносится в головку и снова развиваются ионизационные процессы.

На время пробоя может повлиять и возникновение встречного канала со стороны заземленного электрода (см. фиг. 5, *б*). С ростом частоты вероятность возникновения встречного канала повышается.

Рассмотрим теперь характер изменения проводимости канала в процессе его развития. На фиг. 6 приведены осциллограммы токов через отдельные участки инициатора (I_1, I_3, I_5, I_7) и их сумма — общий ток (I_0). Длина промежутка составляла 140 см; амплитуда приложенного напря-



Ф и г. 7

верхность «токосбора». На фиг. 4 размеры разрядного промежутка $l = 62$ см, $h = 32$ см, толщина диэлектрика 1 мм. На фиг. 4, *а, б* приложено напряжение 60 кВ, а на фиг. 4, *в* — 120 кВ. Из фиг. 4, *б* видно, что центральный канал, развивающийся между двумя другими, имеет такую же длину (скорость развития), что и боковые с неограниченной с одной стороны поверхностью «токосбора». Эта поверхность определяет лишь яркость свечения и проводимость канала. Однако число завершенных каналов зависит от поверхности «токосбора». Дело в том, что после замыкания разрядного промежутка ток резко возрастает, а напряжение на нем падает из-за роста

жения 55 кВ. Здесь же приведена и осциллограмма напряжения на промежутке U . Ток через инициатор имеет две составляющие: $i = C\partial U/\partial t + U\partial C/\partial t$. Так как напряжение имеет вид косинусоиды, то составляющая тока $i \sim \partial U/\partial t$ имеет характерный выброс на фронте импульса напряжения. Сложный характер изменения емкости, определяемый нерегулярным развитием ионизационных процессов, приводит к сложному виду осциллограмм тока (влияние наводок на осциллограммах фиг. 6 отсутствует).

На фиг. 7 показано распределение потенциала в момент пробоя ($t = 17,5$ мкс) и в более ранний момент времени ($t = 7,5$ мкс). Эти распределения коррелируют с осциллограммами токов и позволяют определить характер распределения сопротивления канала по его длине. Так, например, в момент $t = 7,5$ мкс, когда канал достиг длины $l = 120$ см (при $l_{кр} = 105$ см) имело место следующее распределение сопротивления: у высоковольтного электрода ($l = 0$) сопротивление единицы длины $R/l = 70$ Ом/см; в районе $20 \leq l \leq 80$ см значение $R/l = 14$ Ом/см (проводимость при этом составляет $\sigma = 2$ (Ом·см) $^{-1}$); в районе головки канала $60 \leq l \leq 80$ см значение R/l возрастает до 1000 Ом/см. При еще больших длинах сопротивление падает. Это связано с распространением встречного канала, наблюдаемого на СФР-грамме. В течение процесса развития сопротивление канала претерпевает значительные изменения.

Используя зависимость скорости направленного движения электронов от напряженности поля, получаем значение концентрации электронов в канале незавершенного лидера метровой длины $n_e = 10^{14} - 10^{15}$ см $^{-3}$ (это соответствует проводимости порядка единиц (Ом·см) $^{-1}$ в поле 50—100 В/см). В завершенном канале разряда концентрация электронов на один — два порядка выше.

Поступила 23 XII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Toepler R. Stoßspannung Überschlag und Durchschlag bei Isolation. — «Elektrotech. Zeitschrift», 1924, Bd 45, S. 1045.
2. Stregel R. Elektrische Stoßfestigkeit zweite Auflage. Berlin, Springer Verlag, 1955.
3. Roth A. Hochspannungstechnik. Berlin, Springer Verlag, 1959.
4. Дашук П. Н., Зайенц С. Л., Комельков В. С., Кучинский Г. С., Николаевская Н. Н., Шкурюпат П. И., Шнейерсон Г. А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М., Атомиздат, 1970.
5. Taschenbuch Electrotechnik. Bd 2. Berlin, Verlag Technik, 1965.
6. Сиротинский В. Л. Техника высоких напряжений. М., Госэнергоиздат, 1951.
7. Лимасов А. И., Покровский С. Ф. Использование ЭОПа для исследований скользящих разрядов по поверхности твердых диэлектриков. — «Труды Сиб. НИИЭ», 1972, № 10, с. 43.
8. Комельков В. С., Мейлихов Е. З. Рост отрицательных фигур Лихтенберга в наносекундном интервале времен. — ЖТФ, 1963, т. 33, № 8, с. 934.
9. Андреев С. И., Зобов Е. А., Сидоров А. Н. Метод управления развитием и формированием системы параллельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении. — ПМТФ, 1976, № 3.