

**К ВОПРОСУ ОБ ЭНЕРГИИ, ВВЕДЕННОЙ В ПРОВОЛОЧКУ  
К МОМЕНТУ НАЧАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА**

Т. Н. БАРЧЕНКО, М. А. МЕЛЬНИКОВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института  
техники высоких напряжений)

Исследованию явлений, происходящих при электрическом взрыве проводников, в последнее время уделяется значительное внимание в связи с тем, что взрывающиеся проволочки находят широкое применение. О возрождении научного интереса к этому явлению свидетельствуют три международные конференции по данному вопросу, состоявшиеся в США.

Но успешное применение взрывающихся проволочек привело, согласно [7], к необоснованному сокращению теоретических исследований с чисто научной точки зрения и количественного изучения самого явления взрывающихся проволочек.

В настоящей работе, которая является продолжением [1], излагаются результаты исследований энерговыделения в нихромовой проволочке при изменении напряжения генератора.

**Результаты экспериментов и их обсуждение**

В контуре  $R, L, C$ , в котором основным активным сопротивлением является сопротивление проволочки, большая часть энергии должна бы выделяться в ней, но, как известно, в проволочку нельзя ввести неограниченного количества энергии. Препятствием этому служит разрушение материала проволочки, т. е. ее взрыв, который приводит к полному прекращению протекания тока в контуре или прекращению на некоторый промежуток времени. Поэтому может оказаться, что к моменту взрыва проволочки значительная часть энергии, запасенной генерирующей емкостью, не будет использована.

Количество энергии, выделившейся в проволочке к моменту ее взрыва, согласно [2], равно энергии сублимации, по другим данным [3—6] может значительно превышать количество энергии, необходимой для полного испарения проволочки.

В настоящей работе приводятся данные о зависимости энерговыделения в проволочке от плотности тока к моменту ввода энергии, равной энергии сублимации.

Условия опытов следующие: емкость конденсатора контура взрыва проволочки оставалась постоянной и равной  $1,2 \text{ мкф}$ , индуктивность  $0,8 \text{ мкГн}$ , напряжение изменялось от 4,5 до 17 кв. Использована нихромовая проволочка диаметром 0,05 мм, длиной 3 см (энергия сублимации ее  $W = 2,5 \text{ Дж}$ ). Запасенной в конденсаторе энергии даже при напряже-

нии  $U = 4,5$  кв было значительно больше, чем необходимо для взрыва проволочки ( $W_{\text{субл}}$ ). Режим разряда аperiодический  $R(t) > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Основные результаты опытов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Напряжение $U$ , кв	17	14	11	7,5	4,5
$0,5 cU^2$ , дж	173,5	117,5	72,7	36,6	12
$t_0 \cdot 10^{-7}$ , сек	4	4,5	6,5	11÷12	20÷22
$t_1 \cdot 10^{-7}$ , сек	3	3,5	5	9÷10	17÷20
$W_1$ , дж	3	2,8	2,6	2,5	2,5
$W_0$ , дж	4	3,3	3	2,8	2,6
$P$ , мвт	15,6	12,3	8,56	3,84	1,4
$j_a \cdot 10^7$ , а/см <sup>2</sup>	5,2	4,6	3,4	2,4	1,4
$R$ , ом	14,4	15,2	16,5	16,6	18,5
$t_{\text{сп}} \cdot 10^{-7}$ , сек	1	1	1,5	2	2,5÷3
$U_{\text{п}}/U$	>1,65	>1,85	1,91	1,7	1,51
$H^2/8 \pi$ , ат (в точке $a$ )	$2,59 \cdot 10^3$	$2,15 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$5,94 \cdot 10^2$	$2,03 \cdot 10^2$

Плотность тока  $j_a$  в момент начала взрыва проволочки (точка  $a$ , рис. 1) рассчитана, как отношение тока в этот момент к диаметру проволочки при  $t = 20^\circ\text{C}$ .  $U_{\text{п}}$  — наибольшее напряжение при взрыве проволочки. При

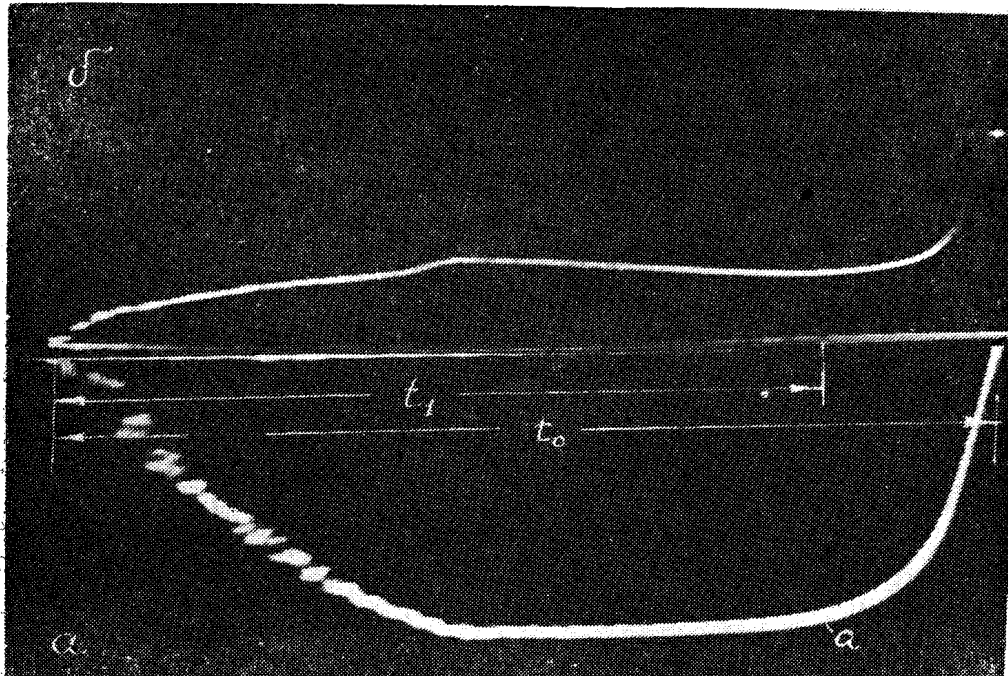


Рис. 1. Оциллограммы тока (а) и напряжения (б) при взрыве проволочки.

$U = 17$  и  $14$  кв пик напряжения не вмещался в экран осциллографа, поэтому указано, что он больше данного в таблице значения.  $P$  — мощ-

ность в точке  $a$ ;  $t_0$  — время от начала протекания тока в проволочке до паузы тока;  $t_1$  — время от начала протекания тока до точки  $a$ ;  $W_0$  и  $W_1$  — энергии, введенные к моментам времени  $t_0$  и  $t_1$ ;  $H^2/8\pi$  — магнитное давление на поверхности проволочки;  $t_{сп}$  — время резкого спада тока.

Рассмотрение результатов, представленных в табл. 1, показывает, что количество энергии, выделившейся в проволочке к моменту начала ее взрыва, увеличивается. При напряжении  $U = 17$  кВ в проволочке к моменту  $a$  выделилось 3 дж, энергия же сублимации проволочки равна 2,5 дж, т. е. увеличение энергии происходит на 20%.

Вышеуказанное возрастание энергии при больших напряжениях (14 и 17 кВ) по сравнению с энергией сублимации в этой работе объясняется инерционностью проволочки.

Согласно модели взрыва проволочки, развиваемой в работе [2], время образования паузы тока равно:

1) времени прохождения волны разряджения от поверхности до оси проволочки, определяемому скоростью звука в рассматриваемом нагретом металле (обозначим его через  $t_3$ ); 2) времени прохождения фронтом деколлективизации того же расстояния.

Потеря проводимости, согласно [2], происходит в течение прохождения фронта деколлективизации электронов.

Очевидно, можно считать, что в течение времени прохождения волны разряджения от поверхности до оси проволочки проводимость заметно не изменится. Проводимость, по-видимому также не изменится пока, хотя бы у небольшой части проволочки, расстояние между ионами не увеличится до такого значения, при котором начинается процесс деколлективизации электронов (обозначим это время —  $t_a$ ). Поэтому время прохождения звуковой волны от поверхности до оси проволочки и время  $t_a$  можно принять за инерционность проволочки.

Время  $t_3$ , если рассчитать его по скорости звука в металле при  $t = 20^\circ\text{C}$ , равно  $5 \cdot 10^{-9}$  сек, но скорость звука в том состоянии вещества проволочки, при котором начинается потеря проводимости, может сильно измениться. Кроме того, диаметр проволочки к моменту взрыва может оказаться большим, чем при  $20^\circ\text{C}$ .

Следовательно, количество энергии, вводимой в проволочку за время  $t_3$  и  $t_a$ , и должно характеризовать избыток энергии. В наших опытах разность между временем  $t_1$  и временем, к которому в проволочке выделилась энергия сублимации, должна характеризовать время инерционности проволочки. Для  $U = 17$  кВ эта разность равна  $0,5 \cdot 10^{-8}$  сек, т. е. на порядок больше рассчитанного значения  $t_3$ .

Естественно предположить, что с увеличением напряжения время инерционности заметно изменяться не будет, а количество энергии, введенной в течение этого времени, будет увеличиваться из-за роста тока через проволочку. Кроме того, с повышением напряжения растет доля этого времени в общем времени  $t_0$  и  $t_1$ , так как  $t_0$  и  $t_1$  уменьшаются с повышением  $U$ .

Этим, по-видимому, можно объяснить результаты работ [3—6], в которых происходило увеличение выделившейся в проволочке энергии с повышением плотности тока в ней.

На основании вышеизложенного можно считать в согласии с [2], что взрыв начинается, когда в проволочку введена энергия, равная энергии сублимации.

Полное количество энергии, выделившейся в проволочке до паузы тока, растет с повышением напряжения. При  $U = 17$  кВ,  $W_0 = 4$  дж, а при  $U = 4,5$  кВ  $W_0 = 2,6$  дж. Это происходит вследствие того, что хотя время спада уменьшается с ростом напряжения, но при этом увеличивается значение тока и напряжения на спаде. Причем, энергия увеличивается

пропорционально квадрату тока, а время спада изменяется незначительно.

Поэтому количество энергии, выделившейся в проволочке на спаде тока, растёт с повышением напряжения. Энергия, выделившаяся во время спада, будет идти на перегрев паров проволочки. Рассмотрим время спада тока  $t_0-t_1$ .

Для выяснения влияния параметров схемы на фронт и спад импульса тока был произведен расчет.

Изменение сопротивления в контуре  $R, L, C$  по времени задано кривой 1 (рис. 2).

Первоначальное изменение сопротивления от бесконечности до установившегося значения имитирует процесс коммутации шаровыми разрядниками.

Известно, что изменение сопротивления искры коммутирующего разрядника от бесконечности до десятых долей *ома* происходит за время порядка  $5 \cdot 10^{-8}$  сек. Спустя  $5 \cdot 10^{-8}$  сек, основным активным сопротивлением контура при  $R > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$  становится сопротивление проволочки

(оно принято равным 21 *омам*). Изменение сопротивления контура при  $t > 0,5$  мксек имитирует взрыв проволочки, в течение которого активное сопротивление изменяется от 21 *ома* до бесконечности.

Время взрыва для удобства сравнения было принято равным времени коммутации. Результаты расчета изменения тока во времени при таком заданном сопротивлении контура приведены на рис. 2 (кривая 2 и 3).

Как видно из рисунка, нарастание тока определяется не коммутатором, а параметрами контура ( $L, C, R$ ), время спада тока при внезапном увеличении сопротивления от установившегося значения до бесконечности зависит лишь от скорости изменения этого сопротивления.

Таким образом, время спада тока при взрыве проволочки характеризует скорость изменения ее сопротивления при расширении, т. е. только процессы внутри проволочки. Согласно [2], это, по-видимому, и будет время прохождения фронта деколлективизации от поверхности до оси проволочки. Как показано в табл. 1, время спада уменьшается с повышением напряжения на конденсаторе. При изменении напряжения от 4,5 до 17 кв это время снизилось с  $(2,5 \div 3) \cdot 10^{-7}$  сек до  $1 \cdot 10^{-7}$  сек соответственно.

Такое уменьшение может быть связано:

- 1) с более быстрым расширением паров проволочки;
- 2) с тем, что проволочка к моменту взрыва имеет разные диаметры при разных напряжениях.

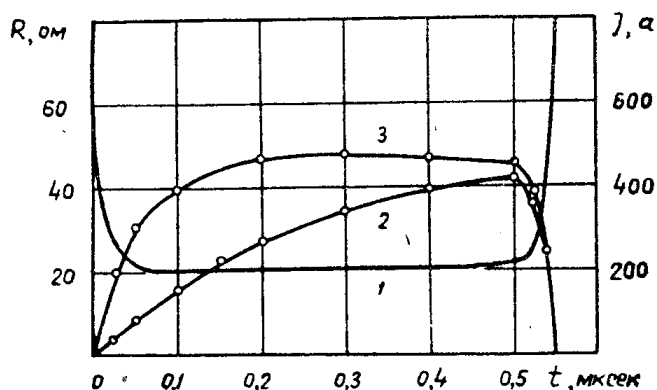


Рис. 2. Влияние параметров контура  $R, L, C$  на время нарастания и время спада тока при заданном изменении активного сопротивления от времени: 1 —  $R(t)$ ; 2 —  $I(t)$  при  $L = 5$  мкГн,  $C = 1$  мкФ; 3 —  $I(t)$  при  $L = 1$  мкГн,  $C = 1$  мкФ.

Из табл. 1 видно, что с уменьшением напряжения увеличивается время до взрыва проволоки  $t_1$  и уменьшается магнитное давление ( $H^2/8\pi$ ). Поэтому можно ожидать, что проволока при низких напряжениях имеет больше возможности расширяться, чем при высоких напряжениях.

Характеристикой, указывающей на большее расширение проволоки при малых напряжениях, является сопротивление, измеренное в момент начала взрыва. Из таблицы видно, что это сопротивление больше при малых напряжениях, но различие (18,5 ом при  $U=4,5$  кв против 14,4 ома при  $U=17$  кв) небольшое.

На основании этого можно считать, что время спада определяется не столько диаметром проволоки, сколько скоростью расширения паров проволоки. Следовательно, с увеличением напряжения растет скорость расширения паров и уменьшается время спада тока. Таким образом, можно ожидать, что при больших напряжениях скорости ударных волн должны быть выше, что неоднократно отмечалось в литературе.

С увеличением напряжения растет плотность тока и мощность в точке  $a$ , плотность — пропорционально напряжению в первой степени, а мощность — квадрату напряжения.

### Выводы

1. Взрыв проволоки происходит не в момент максимума тока в контуре, а при сообщении проволоки энергии, равной энергии сублимации.

2. С увеличением плотности тока к моменту начала взрыва количество энергии, введенной в проволоку, может превышать ее энергию сублимации. Это превышение происходит вследствие инерционности проволоки.

3. Полное количество энергии, введенной в проволоку до паузы тока, может значительно превышать энергию, необходимую для взрыва проволоки, и увеличение будет тем значительнее, чем выше плотность тока к началу взрыва проволоки.

4. С повышением напряжения (вернее, плотности тока в точке  $a$ ) уменьшается время спада тока, что, по-видимому, происходит из-за более быстрого расширения паров проволоки. Это должно приводить к возникновению более мощных ударных волн.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Мельников, Т. Н. Барченко. Изв. вузов — Физика, 4, 1965.
2. Н. А. Протопопов, В. М. Кульгавчук. ЖТФ, 31, 5, 557, 1961.
3. И. Ф. Кварцхана, В. В. Бондаренко, А. А. Плюто, А. А. Чернов, ЖЭТФ, 31, 5 (11), 745, 1956.
4. Взрывающиеся проволоки. Ред. Рухадзе А. А., ИИЛ, М., 1963.
5. Электрический взрыв проводников. Ред. Рухадзе А. А., ИИЛ, 1965.
6. T. J. Gucker. J. Appl. Phys. 32, 10, 1894, 1961.
7. Y. Чейс. УФН, т. 85, 2, 381, 1965.