

## НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧЕК В ВАКУУМЕ

А. К. Запольский, В. Б. Розанов, И. В. Холин

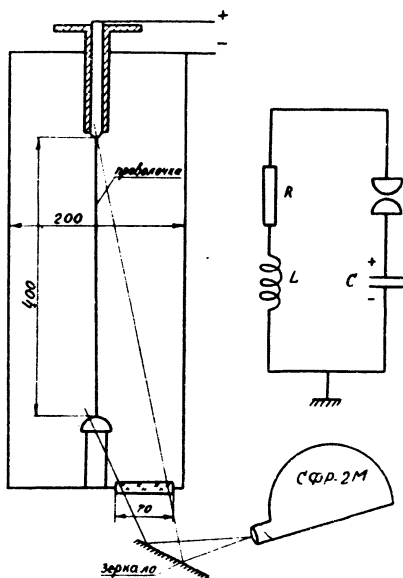
Уже долгое время взрывающиеся проволочки привлекают к себе пристальное внимание исследователей многих стран. Однако до недавнего времени исследования проводились при сравнительно небольших энергиях, вводимых в проволочку, а максимальные токи не превышали нескольких десятков килоампер /1/. В последние годы получили развитие работы, связанные с использованием взрывающихся проволочек в качестве мощных источников света.

В работах /1,2/, посвященных сильноточному разряду в вакууме, исследовалась главным образом развитая, квазистационарная стадия разряда. Экспериментально начальная стадия разряда не изучалась. В работах /3,4,5/, посвященных численным расчетам сильноточных разрядов, в качестве начальной стадии принималось, что фазовый переход металла в пар происходит по всему объему проводника, а затем плазменный столб с определенным распределением температуры по радиусу разлетается до тех пор, пока не наступит пинчевание или удар о стенку камеры. В данной работе авторы отмечают интересные особенности начальной стадии взрыва, наблюдавшиеся экспериментально.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Опыты производились в стальной камере диаметром 200 мм. Проволочка закреплялась на оси камеры между двумя электродами из нержавеющей стали, и весь объем откачивался до давления  $(2+3) \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Использовалась батарея конденсаторов емкостью 120 мкф, заряжаемая до максимального напряжения 25 кв. Все эксперименты проводились с медной проволочкой диаметром 0,38 мм. Разрядный ток через проволочку измерялся поясом Роговского. С помощью сверхскоростного фоторегистратора СФР-2М производилась киносъемка газряда с частотой  $5 \cdot 10^5$  кадров в сек.

Индуктивность разрядной камеры и подводящих шин составляла 320 нГн.

В различных экспериментах напряжение на батарее конденсаторов менялось от 7 до 25 кВ, что соответствовало запасенной энергии

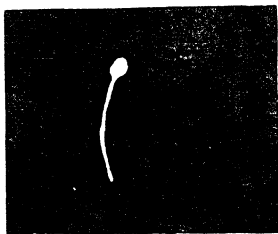


Р и с. 1. Схема экспериментальной установки.

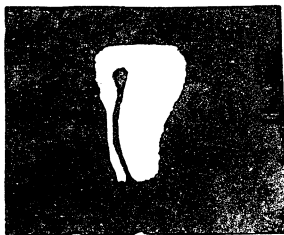
гии 2,9 + 37,5 кДж. Во всем промежутке исследованных напряжений картина развития разряда существенно не менялась. На кадрах сверхскоростной фотографии (рис. 2) видно, что под действием тока проволока сначала разогревается, а затем происходит пробой по парам, образующимся вблизи ее поверхности. После этого, примерно, к 24-й микросекунде, разрядный столб распадается, и ток начинает идти в основном по объему камеры, причем проволока сохраняет свою первоначальную форму и местоположение. На рис. 2 зарегистрирован случай, когда проволока вначале имела изгиб. Видно, что в первый момент ток шел вдоль проволоки, а затем разряд выпрямился, так что проволока к 16-й микросекунде оказалась на периферии разряда.

Во второй части эксперимента индуктивность электрической цепи была увеличена до 600 нГн. При напряжениях на батарее конденсаторов ниже 23 кв картина разряда оставалась прежней, одна-

а



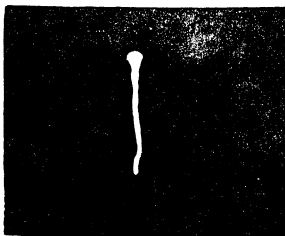
б



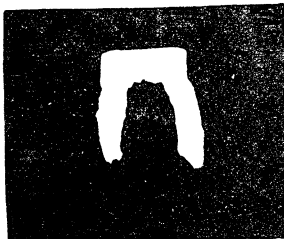
Р и с. 2. Вид разряда при индуктивности электрической цепи  $L = 320$  нГн на 2-й (а) и 16-й (б) микросекундах.

ко она качественно изменялась (рис. 3), когда напряжение поднималось выше 24 кв. В этом случае проволочка испарялась одновременно по всему объему, но светилась лишь внешняя часть газового облака, по которой шла основная часть тока. Толщина светящейся

а



б



Р и с. 3. Вид разряда при индуктивности электрической цепи  $L = 600$  нГн на 2-й (а) и 14-й (б) микросекундах.

области с течением времени заметно не менялась, в то же время радиус внутренней холодной области увеличивался со средней скоростью примерно 1,4 км/сек.

В указанных выше работах /3/ - /5/ принимается, что вследствие интенсивного выделения Джоулева тепла металл нагревается до критической температуры за времена порядка нескольких микросекунд. Принимается также, что фазовый переход во всех точках проводника происходит одновременно.

Таким образом, фактически в указанных работах исследуются не процессы взрыва проволочек, а динамика разлета плазменного шнура с заданным распределением температуры по радиусу. Настоящая работа позволяет сделать вывод, что фазовый переход вещества проволочки осуществляется не обязательно одновременно по всему объему металла и динамика перехода сложным образом зависит от параметров электрической цепи.

Можно предположить, что характер взрыва проволочки зависит только от того времени, за которое в нее вводится энергия, необходимая для полной сублимации металла ( $E_c \approx 2,4$  кдж). Однако экспериментальные результаты опровергают это предположение.

Время  $t_c$  можно вычислить из уравнения

$$E_c = \int_0^{t_c} RI^2 dt, \quad (1)$$

где  $I$  — ток, протекающий по цепи, изображенной на рис. 1. Так как энергия, затрачиваемая на нагревание проволочки до температуры кипения, составляет малую часть от энергии, необходимой для ее испарения, в качестве  $R$  следует брать сопротивление проволочки, находящейся в жидкой фазе. В нашем случае  $R \approx 0,7$  ом. Тогда

$$I = \frac{U_0}{R} [\exp(-t/RC) - \exp(-Rt/L)], \quad (2)$$

где  $U_0$  — начальное напряжение на батарее конденсаторов.

В опытах с индуктивностями 600 и 320 нГн при напряжениях соответственно 24 и 22 кВ время сублимации (в предположении, что ток течет только по проволочке до ее полного испарения) составляет одну и ту же величину, равную  $\sim 4$  мксек, а характер разряда, вместе с тем, существенно различен.

Следует сделать вывод, что на вид разряда влияние оказывает величина напряжения, приложенного к разрядной камере, причем эта зависимость носит пороговый характер. Можно предположить, что для каждой скорости ввода энергии существует область напряжений, в которой соотношение токов, текущих по парам и по проволочке таково, что происходит полное испарение металла. Картина разряда в этом случае качественно напоминает стационарный

режим сильноточного разряда, рассчитанный в работе /3/, а именно, внешняя часть разряда имеет значительно более высокую температуру, чем внутренняя.

Следует отметить, что похожее развитие сильноточного разряда наблюдалось в работе /7/, где было предложено следующее объяснение полученной картины: в начальный момент времени частицы, испускаемые нагретой поверхностью проволоочки, иницируют разряд на периферии. Испускание может происходить как вследствие испарения, так и в результате термомонной эмиссии. Тот факт, что образование горячей коры разряда происходит в нашем случае при существенно больших длительностях импульсов тока и вводимых в проволоочку энергиях, указывает на универсальность наблюдаемого явления. К сожалению, на основании предложенного в работе /7/ механизма не удается объяснить наблюдаемую экспериментально резкую смену режима разряда при незначительном изменении напряжения на конденсаторной батарее. Разряды, в которых проволоочка в течение длительного времени (около 25 мсек) сохраняет свою форму и положение, наблюдались и раньше /8/, однако нами, по-видимому, впервые осуществлен переход одного режима в другой при изменении электрических параметров цепи разряда. Отметим, что при скоростях нарастания тока, реализованных в эксперименте, скин-эффект не играет роли ни в металлической ни в плазменной фазе проводящего столба.

Указанные факты необходимо принимать во внимание при проведении расчетов процессов, происходящих при взрыве проволоочки в вакууме.

Поступила в редакцию  
6 января 1972 г.

### Л и т е р а т у р а

1. К. Б. Абрамова. Диссертация ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Ленинград, 1969 г.
2. А. Д. Клементов, Г. В. Михайлов и др. ТВТ, 8, 736 (1970).
3. А. А. Вахов, А. Д. Клементов и др. Кр. сообщ. по физике, № 10, 53 (1970).

4. Ю. П. Попов. Расчет электротехнических цепей в задачах магнитной гидродинамики. Препринт ИИМ, 1969 г.
5. В. Я. Гольдин, Н. Н. Калиткин. Электрический взрыв проволоки. Препринт ИИМ, 1970 г.
6. П. П. Волосевич, В. Я. Гольдин и др. "Некоторые стадии сильно-точного разряда в плазме". Препринт ИИМ, 1970 г.
7. L. Niemeyer. Z. Naturforsch., 24a, 1707 (1969).
8. А. Д. Клементов, Г. В. Михайлов и др. Препринт ФИАН № 126, 1969 г.