

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ПОРОШКОВОМ ТЭНЕ

П. И. Зубков, Л. А. Лукьяничков

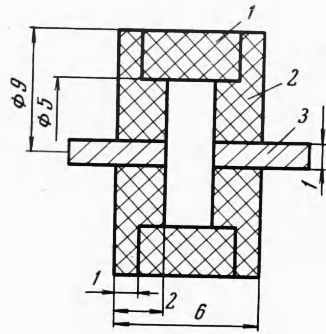
(Новосибирск)

Приводятся некоторые результаты осциллографических исследований электрического разряда в порошковом тэне плотности  $(0.5 - 1.2) \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Используется гидродинамическая модель развития токопроводящего канала; даются оценки быстроты его развития, значения его радиуса и проводимости в нем. Показано, что продукты превращения тэна обладают проводимостью не выше, чем  $7 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ .

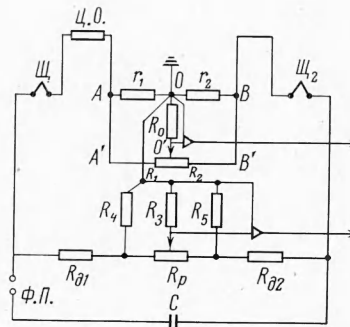
В стационарной детонации конденсированных взрывчатых веществ зарегистрирована зона достаточно высокой электропроводимости. В работе [1] дается оценка электропроводимости продуктов взрыва, определяемая термической ионизацией по экспериментально измеренной температуре продуктов детонации взрывчатых веществ. Ее значение лежит в пределах от  $10^7$  до  $10^9 \text{ сек}^{-1}$ . Авторы работы [2] измерили электропроводимость продуктов взрыва, она оказалась существенно выше оценочных значений работы [1] и составила  $(0.23 - 5.00) \cdot 10^{13} \text{ сек}^{-1}$ . Однако анализ осциллограмм, приведенных в [2], показывает, что высокой электропроводимостью обладает узкая зона во фронте детонационной волны, сами же продукты, если и проводят, то проводимость их, по-видимому, не выше оценок работы [1]. Исключить влияние детонационного фронта на процесс измерений удастся при иницировании порошковых ВВ электрическим разрядом.

Ниже приведены результаты исследования электрического разряда в порошковом тэне малой плотности  $(0.5 - 1.2 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3})$ , заключенном в оболочку из оргстекла. Схема ее приведена на фиг. 1, где 1 — корпус, 2 — крышка, 3 — электрод. Показано, что продукты превращения, находящиеся под высоким давлением имеют электропроводимость, не превышающую  $7 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ .

В процессе исследования изменялись плотность и дисперсность частиц тэна. Ток и напряжение электрического разряда измерялись посредством осциллографирования с использованием схемы компенсации (фиг. 2). Применение известных схем измерения тока и напряжения в данном случае затрудняется большой агрессивностью взрыва.



Фиг. 1



Фиг. 2

Особенности работы указанной выше схемы заключаются в следующем. При разряде конденсатора  $C$  по участку контура  $AOB$  течет практически весь разрядный ток, так как величины сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  много меньше сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  соответственно. Примем потенциал точки  $O$  за нулевой. В некоторый момент потенциал точки  $A$  относительно  $O$  будет равен

$$U_1 = r_1 I + L_1 \frac{dI}{dt}$$

а потенциал точки  $B$  относительно  $O$  будет

$$U_2 = - \left( r_2 I + L_2 \frac{dI}{dt} \right)$$

Здесь  $I$  — ток в контуре,  $L_1, L_2$  — индуктивность контуров  $AOO'A'$ ,  $BOO'B'$  соответственно. Параметры контуров  $AOO'A'$  и  $BOO'B'$  подбираются таким образом, чтобы  $L_1 = L_2$ , а  $r_1 \neq r_2$ .

Тогда падение напряжения на участке  $AB$  будет

$$U = U_1 + U_2 = (r_1 + r_2) I$$

Сигнал, снимаемый с сопротивления  $R_6$ , пропорционален  $U$ . В большинстве случаев с достаточной степенью точности можно положить  $r_2 = 0$  (медная проволока). Для проверки сбалансированности схемы в измерительное плечо вместо сопротивления  $r_1$  включается сопротивление, по номиналу и форме совпадающее с  $r_2$ . Если схема сбалансирована, то осциллограмма тока совпадает с нулевой линией данного луча.

Схема для измерения напряжения построена по тому же принципу, что и токовая, от которой она отличается только величиной сопротивлений в плечах компенсации. Балансировка схемы осуществляется при закороченно исследуемом промежутке. В этом случае осциллограмма напряжения должна совпадать с нулевой линией данного луча.

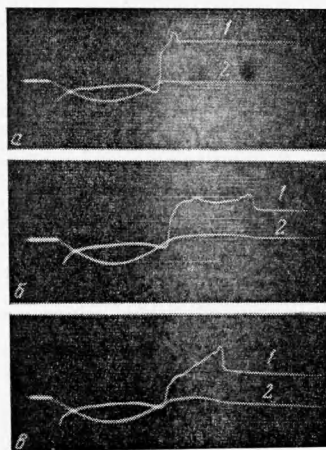
Параметры разрядного контура во всех экспериментах были одинаковы и составляли  $C \sim 0,1$  мкф и  $L \sim 4$  мкн. Изменение начального напряжения на конденсаторе позволяло получать различные мощность и энергию, выделяющиеся в исследуемом промежутке, величина которого во всех экспериментах была равна 2 мм. Примеры осциллограмм тока и напряжения электрического разряда в порошковом тэне приведены на фиг. 3, а, б, в.

Общий ход напряжения на промежутке при электрическом разряде в порошковом тэне исследуемой плотности и дисперсности может быть представлен последовательностью четырех стадий. Первые три стадии по своему характеру аналогичны трем стадиям электрического разряда в воздухе при нормальных условиях, однако уже во второй стадии начинаются существенные отличия, характеризующиеся более медленным падением напряжения на промежутке и его большей величиной. Продолжительности первых трех стадий и величины напряжений в них определяются параметрами тэна (плотность, дисперсность) и начальным напряжением на разрядной емкости и составляют для второй стадии  $(0,5-1) \cdot 10^{-6}$  сек,  $(0,5-1,2) \cdot 10^{-6}$  сек — для стадии дуги. Характер дуги электрического разряда в порошковом тэне зависит от энергии, выделившейся в исследуемом промежутке к этому времени.

Если выделившаяся энергия достаточна для возникновения самоподдерживающегося превращения тэна, то стадия дуги переходит в четвертую стадию, отсутствующую при электрических разрядах в газах. Первые три стадии имеют место только в первом полупериоде разряда. Четвертая же стадия в зависимости от параметров тэна и начального напряжения на разрядной емкости реализуется или в конце первого полупериода, или в начале второго. В конце первого полупериода она имеет место при разряде в порошковом тэне плотности  $0,5-0,6$  г/см<sup>3</sup> и начальном напряжении 8—10 кВ, а также при плотности 1—1,2 г/см<sup>3</sup> и начальном напряжении 13—15 кВ (фиг. 3, а; где 1 — напряжение на исследуемом промежутке, 2 — ток в контуре). В этом случае характерной особенностью четвертой стадии является быстрый (за время  $0,5 \cdot 10^{-6}$  сек) рост напряжения от дугового до 1,5—2 кВ и более, затем резкий спад за время  $\sim 10^{-7}$  сек. Как правило, пробой промежутка во втором полупериоде не происходит, на промежутке остается напряжение 3—6 кВ. Разряд прекращается.

Увеличение начального напряжения на разрядной емкости при разряде в порошковом тэне плотности  $0,5-0,6$  г/см<sup>3</sup> приводит к тому, что, начиная с 11 кВ, четвертая стадия передвигается во второй полупериод (фиг. 3, б). Во втором полупериоде она имеет место и при разряде в порошковом тэне плотности  $0,7-0,9$  г/см<sup>3</sup> при напряжении на емкости 10—15 кВ. В этом случае в начале второго полупериода напряжение на исследуемом промежутке растет до 1—1,5 кВ за время  $\sim 2 \cdot 10^{-7}$  сек, затем медленно падает на 300—400 в к середине полупериода и снова растет, достигая в конце полупериода 1,5—2 кВ. По окончании второго полупериода напряжение резко падает, и разряд прекращается. В некоторых случаях (фиг. 3, в) напряжение в начале четвертой стадии растет более медленно и достигает 5—6 кВ, затем за время  $10^{-7}$  сек падает до 2—4 кВ. В этом случае разряд гаснет в середине второго полупериода. Гашение разряда фиксируется по нулевому значению тока.

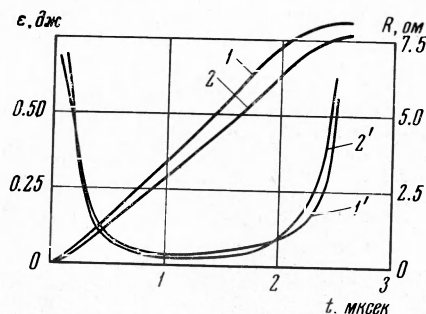
Анализ осциллограмм показывает, что ток первого полупериода во всех случаях определяется параметрами разрядного контура и совпадает по величине с током газового разряда. Если же четвертая стадия имеет место во втором полупериоде, то ток в этом случае в 2—3 раза меньше тока газового разряда.



Фиг. 3

По осциллограммам тока и напряжения можно вычислить энергию, выделяющуюся в промежутке, и сопротивление промежутка как функции времени; соответствующие зависимости представлены на фиг. 4, кривые 1 и 1' для  $\rho_0 = 0.6 \text{ г/см}^3$ ,  $U_0 = 10 \text{ кв}$ , кривые 2 и 2' для  $\rho_0 = 0.5 \text{ г/см}^3$ ,  $U_0 = 10 \text{ кв}$ . Следует отметить, что при электрическом разряде в порошковом тэне энергия, выделяющаяся в промежутке, в 3—5 раз больше энергии газового разряда при нормальных условиях.

Развитие электрического разряда в газах носит гидродинамический характер. Выделяющаяся в разрядном промежутке энергия приводит к появлению сильной расходящейся цилиндрической ударной волны, осуществляющей практически полную ионизацию газа [3]. Фронт волны является в этом случае границей токопроводящей зоны канала, развитие которого осуществляется во второй стадии [4].



Фиг. 4

В случае электрического разряда в порошковом тэне плотность энергии в промежутке через  $0.2-10^{-6} \text{ сек}$  после начала разряда (когда, судя по осциллограммам, энерговыделение тэном можно считать несущественным) оказывается  $10^2 \text{ кал/см}^3$ , т. е. того же порядка, что и плотность энергии малокалорийных ВВ. Поэтому можно предположить, что развитие электрического разряда в порошковом тэне, так же как и в газах, происходит по гидродинамической модели. Однако в этом случае образовавшаяся при

пробое промежутка ударная волна, по-видимому, не является границей токопроводящего канала. Канал ограничен ускоренным ударной волной веществом, а его развитие осуществляется за счет ионизации газа в объеме, освобожденном радиально расширяющимся тэном, скорость движения которого определяется интенсивностью ударной волны и энерговыделением в промежутке.

Значение плотности энергии было получено по величине энергии, выделившейся в промежутке, и по оценкам радиуса токопроводящего канала (таблица). Следует заметить, что плотность энергии в промежутке с течением времени падает, следовательно, сразу же после пробоя ее значение, по-видимому, не меньше, чем  $10^2 \text{ кал/см}^3$ .

Продолжительность второй стадии разряда в порошковом тэне (стадии развития токопроводящего канала) на порядок больше второй стадии разряда в газе. Это, вероятно, связано с тем, что скорость ударной волны в тэне существенно меньше скорости ударной волны в воздухе, несмотря на большую (в 3—5 раз) энергию, выделившуюся в промежутке. Зная эту энергию из экспериментов, можно на основании предполагаемой гидродинамической модели оценить скорость развития токопроводящего канала.

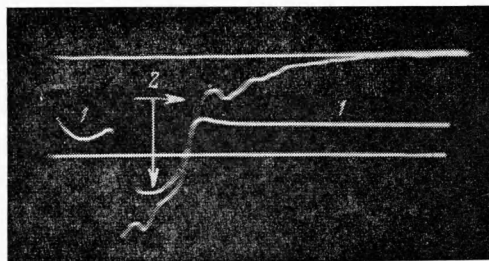
$t \cdot 10^7 = 2$	4	6	8	10	(сек)
$U = 650$	560	500	460	450	(м/сек)
$r \cdot 10^2 = 1.7$	2.9	4.0	5.0	5.7	(см)
$\sigma \cdot 10^{-14} = 0.40$	0.46	0.47	0.49	0.47	(сек <sup>-1</sup> )

В таблице приведены оценочные значения скорости развития токопроводящего канала, значение его радиуса и проводимости в канале. Как и предполагалось, скорость развития токопроводящего канала в рассматриваемом случае оказалась почти на порядок меньше скорости развития канала при разряде в газе [4].

Оценка величин, приведенных в таблице, производилась в предположении, что канал цилиндрический, а ударная волна считалась достаточно сильной, чтобы пренебречь начальным давлением, но недостаточной для сжатия кристаллического вещества и для возбуждения детонационного превращения тэна. Последнее предположение оправдано тем, что характер осциллограмм напряжения на промежутке начинает меняться только после стадии дуги. Далее предполагалось, что в зоне ударного перехода осуществляется сжатие тэна до плотности, близкой к монокристаллу, вещество за ударным переходом считалось несжимаемым и пренебрегалось развитием токопроводящего канала за счет увеличения степени ионизации газа в нем (оценка проводимости дает практически постоянную величину (таблица)). Последние предположения довольно произвольны.

По оценочным значениям радиуса токопроводящего канала в предположении, что в области, занятой тэном, плотность тока равна нулю, вычислена электропроводимость плазмы разряда. Она оказалась совпадающей с проводимостью плазмы газового разряда [5], что может косвенно свидетельствовать в пользу сделанных выше предположений.

В стадии дуги сопротивление промежутка считается практически постоянным и составляет 0,3—0,5 ом. По-видимому, к этому времени развитие токопроводящего канала заканчивается, а начавшееся превращение тэна еще не может существенно повлиять на ионизацию плазмы дуги. Часть выделяющейся в промежутке энергии концентрируется в виде тепла в прогретом слое частиц тэна. Это приводит к тому, что при достижении некоторой температуры скорость превращения тэна оказывается такой, что продукты превращения начинают значительно сказываться на параметрах разряда. Вероятно, этот момент может быть связан с моментом перехода разряда из стадии дуги в четвертую стадию. Место четвертой стадии в разряде будет определяться временем прогрева частиц тэна и скоростью его превращения. Оба эти фактора должны зависеть от размера частиц и плотности заряжения, что и наблюдается в экспериментах.



Фиг. 5

Как указывалось выше, одной из характерных особенностей разряда в порошковом тэне является обрыв тока или в конце первого полупериода, или во втором. Обрыв тока происходит за счет взаимодействия высокопроводящей зоны канала с продуктами превращения тэна, находящимися под высоким давлением. По-видимому, продукты превращения к этому времени обладают низкой проводимостью. Для оценки этой проводимости была предпринята попытка измерить ток в конце четвертой стадии разряда. Сигнал датчика тока через диодный ограничитель подавался на вход усилителя осциллографа ОК-17М. На оциллограмме (фиг. 5, где 1 — напряжение на исследуемом промежутке, 2 — ток в контуре, снятый через ограничитель) видно, что через  $8 \cdot 10^{-6}$  сек после начала разряда при данной точности измерений величина тока не может отличаться от нулевой. (Несовпадение фазы тока и напряжения на участке  $4 \cdot 10^{-6}$  сек в конце разряда объясняется плохой переходной характеристикой ограничителя.) Для оценки электропроводимости сверху предположим, что возможная зона проводимости ограничена областью, равной по диаметру разрядному электроду (1 мм). В этом случае проводимость продуктов не выше  $7 \cdot 10^6$  сек<sup>-1</sup>.

Поступила 8 XII 1969

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алинцев М. Н., Беляев А. Ф., Соболев Н. Н., Степанов Б. М. Измерение температуры сведения взрыва взрывчатых веществ оптическим методом. ЖЭТФ, 1946, т. 16, вып. 11.
2. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных веществ. ЖЭТФ, 1959, т. 37, вып. 6.
3. Мандельштам С. Л., Суходрев Н. К. Элементарные процессы в канале искрового разряда. ЖЭТФ, 1953, т. 24, вып. 6.
4. Гегечкори Н. М. Экспериментальное исследование канала искрового разряда. ЖЭТФ, т. 21, вып. 4.
5. Абрамсон И. С., Гегечкори Н. М. Осциллографические исследования разряда. ЖЭТФ, 1951, т. 21, вып. 4.