

ЛИТЕРАТУРА

1. Берман В. С., Рязанцев Ю. С. Асимптотический анализ стационарного распространения двухстадийной экзотермической реакции в газе.— ПММ, 1973, № 6.
2. Вилюнов В. Н. Приближенные методы решения задач тепловой теории зажигания.— В кн.: Первый Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докладов. М., «Наука», 1968.
3. Вилюнов В. Н., Гольдман Р. С. О применении метода срачиваемых асимптотических разложений к одной задаче зажигания.— В кн.: Материалы IV конференции по математике и механике. Томск, изд. Томск. ун-та, 1974.
4. Зельдович Я. Б. К теории зажигания.— «Докл. АН СССР», 1963, т. 150, № 2.
5. Enig J. W. Condition in time-dependent thermal explosion theory.— «J. Chem. Phys.», 1964, vol. 4, N 12.
6. Гришин А. М. О зажигании реагирующих веществ.— ПМТФ, 1966, № 5.
7. Вилюнов В. Н., Сидонский О. Б. К теории воспламенения конденсированных систем накаленной поверхностью.— «Докл. АН СССР», 1963, т. 152, № 1.
8. Сидонский О. Б. Исследование скорости сходимости некоторых разностных задач путем математического эксперимента.— В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 3. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1972, № 1.
9. Вилюнов В. Н. Зажигание пластины конденсированного вещества горячим телом при продолжительном действии источника тепла.— «Труды НИИ ПММ», изд. Томск. ун-та, 1973, т. 3.

УДК 537.527.5; 533.9.07

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ
В ГАЗЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
ДЛЯ РАЗМЫКАНИЯ ТОКОВ**

Г. П. Глазунов, В. П. Канцедал, Р. В. Митин

(Харьков)

Большие плотности энергии, запасаемой магнитным полем индуктивных накопителей, делают перспективным их применение в экспериментальной физике. Наибольшие запасы энергии достигнуты в сверхпроводящих накопителях и импульсных накопителях, работающих от взрывомагнитных генераторов (токи до $3 \cdot 10^8$ А) [1].

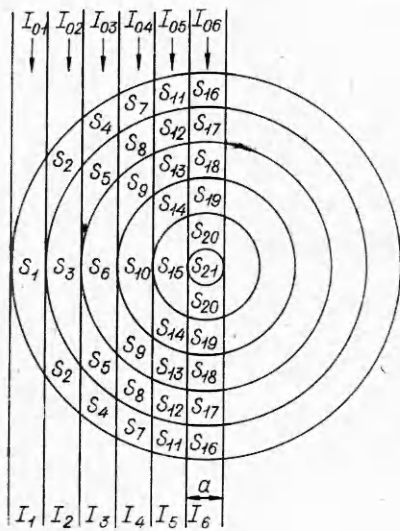
Использование энергии, запасенной в магнитном поле, производится размыканием тока в цепи накопителя и включением в цепь нагрузки. Для этого, в частности, используются переключатели на основе электрического взрыва проводников (ЭВП) [1]. При создании таких размыкателей существует следующая трудность: после электрического взрыва образуется столб из металлических паров, в котором может произойти пробой; тогда процесс размыкания затягивается и понижается эффективность передачи энергии. Задача заключается в том, чтобы материал проводника мгновенно перевести в пар, т. е. диэлектрик, выдерживающий напряжения, возникающие при переключении индуктивного накопителя на нагрузку.

С ростом давления окружающей среды при ЭВП затрудняется возникновение шунтирующих дуг и создаются условия для более полного перехода материала проволоки в пар. Проведен ряд опытов с различными

Материал проволоочки	Диаметр проволоочки, мм	l , см	p , атм	I_{\max} , кА	I'_{\max} , кА	U_0 , кВ	τ , мкс
Al	0,5	6	10	9	7,5	3	10
	0,5	6	100	9	4,5	3	
	0,5	6	200	9	2,8	3	
	0,5	6	300	9	0	3	
	0,5	6	600	9	0	3	
	0,5	6	600	14	13	5	
Li	1	6	100	9	5,5	3	20
	1	6	300	9	0	3	
	1	6	750	9	0	3	
	1	6	750	13	5,5	5	
Ti	0,6	4	10	11	15	3	10
	0,6	4	400	11	5	3	
	0,6	4	600	11	0	3	
	0,6	4	600	23	31	6	
Cu	0,8	6	750	13	13	3	

ми металлами с целью выяснения возможности использования ЭПВ в газе высокого давления для размыкателей тока. Установка содержала камеру высокого давления с введенными в нее электродами, между которыми закреплялась проволочка из исследуемого металла. Камера заполнялась аргоном при давлениях 1—750 атм. Диаметр проволочек в различных опытах 0,5—1 мм. Через управляемый разрядник на проволочку разряжалась батарея конденсаторов емкостью 200 мкФ, напряжением 3—6 кВ, индуктивность цепи ~ 1 мкГ, длительность первого полупериода тока 50—100 мкс. Ток и напряжение измерялись с помощью шунта и делителя напряжения, сигналы с которых записывались осциллографами С1-29. Полученные результаты сведены в таблицу, где l — длина проволоочки; p — давление инертного газа в рабочей камере; I_{\max} — максимальный ток перед взрывом проволоочки; I'_{\max} — максимальный ток разряда, возникающего после ЭВП; U_0 — напряжение на батарее конденсаторов; τ — время замыкания, т. е. время, за которое значение тока от максимального падает до нуля. Из таблицы видно, что при определенном давлении (разном для различных металлов) наступает эффект замыкания, т. е. после нарастания тока происходит ЭВП и электрическая цепь прерывается. В этом случае на батарее конденсаторов остается часть запасенной мощности. Из исследуемых металлов наиболее подходящими для замыкания тока оказались Li и Al. При давлении выше 300 атм проволоочки из этих металлов эффективно замыкали токи до 10 кА и напряжения $\approx 1,5$ —2 кВ. Для проволочки Ti это давление выше 600 атм. Для меди даже при давлениях около 750 атм не удается погасить разряд и добиться замыкания при тех же параметрах электрической цепи. Такое различие обусловлено, по-видимому, термодинамическими свойствами (температура плавления, кипения, теплота сублимации, критические параметры и т. д.) элементов и требует дальнейшего изучения. Заметим, что критическое давление для Cu намного выше, чем у Li, Al или Ti. В данной работе не ставилась задача получить экстремально высокие значения замыкаемых токов и напряжений. Увеличения тока можно достигнуть, повышая напряжение на батарее, что требует увеличения длины взрывающей проволоочки.

Для исследования кинетики разлета продуктов взрыва применялось поперечное рентгеновское просвечивание. Рассмотрим методику пересчета



сигналов поглощения рентгеновских лучей в радиальное распределение плотности. Поскольку получение распределения методом Абеля аналитически довольно сложно, задача решалась численно в предположении цилиндрической симметрии подобно тому, как это делалось в работе [2] для симметричных излучателей. Проекция сверху исследуемого объема показана на фигуре. Цилиндр поглощающего вещества разбит на шесть кольцевых зон шириной a , плотность в каждой из которых считается постоянной. Начальная интенсивность рентгеновского излучения I_{0k} , конечная I_k , где k — номер полосы шириной a , пронизывающей цилиндр поглощающего вещества. Поглощение рентгеновских лучей описывается законом

$$(1) \quad I_k = I_{0k} e^{-\mu \rho_k d_k},$$

где μ — массовый коэффициент поглощения; ρ_k — плотность вещества; d_k — толщина поглощающего слоя. Для точного решения необходимо интегрирование уравнения (1), так как d_k для каждого участка поглощения S_i меняется с радиусом. Задачу упростили, считая $d_i = S_i/a$, где S_i — площадь участка поглощения. Площади S_i находились с использованием коэффициентов, приведенных в [2]. Таким образом, интенсивность прошедшего через цилиндр рентгеновского излучения для первой полосы запишется в виде

$$(2) \quad I_1 = I_{01} e^{-\mu \rho_1 \frac{S_1}{a}} = I_{01} e^{-A \rho_1 S_1},$$

где $A = \mu/a$ — величина, постоянная для данного вещества и выбранной геометрии.

Для второй полосы

$$(3) \quad I_2 = I_{02} e^{-2A \rho_1 S_2} e^{-A \rho_2 S_3}$$

и т. д. для всех шести полос. Решая уравнения типа (2), (3) относительно ρ_1, \dots, ρ_6 , получим

$$\rho_1 = \frac{\ln \frac{I_1}{I_{01}}}{-A S_1}, \quad \rho_2 = \frac{\ln \frac{I_2}{I_{02}} + 2A \rho_1 S_2}{-A S_3}, \dots$$

Величины I_k/I_{0k} определяются экспериментально, рентгеновским просвечиванием. Величины S_i рассчитываются по методике, описанной в [2], а в качестве μ при расчете A использовалась справочная величина коэффициента массового поглощения для рентгеновских лучей с длиной волны $\lambda_{эфф}$, соответствующей эффективной длине волны для пучка от рентгеновской трубки с напряжением на аноде 30 кВ. На основе этой методики рассчитано радиальное распределение плотности при электрическом взрыве Ni проволоки в гелии при давлении 10 атм. Показано, что в момент максимума разрядного тока продукты взрыва расширяются в виде пустотелого цилиндра со скоростью ≈ 230 м/с.

Авторы выражают благодарность Э. А. Азизову, Н. А. Ахмерову, А. В. Звягинцеву за обсуждение и полезные советы.

Поступила 29 III 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Л. С., Искольдский А. И., Нестерихин Ю. Е., Пинус В. К. Передача энергии из индуктивного накопителя с помощью электровзрывного размыкателя тока.— ПМТФ, 1975, № 1.
2. Пирс. Расчет распределения по радиусу фотонных излучателей в симметричных источниках.— В кн.: Получение и исследование высокотемпературной плазмы. М., ИЛ, 1962, с. 221.

УДК 533.952

**РАСЧЕТЫ ТЫЛЬНОГО ОТКОЛА МЕДНОГО АНОДА
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В РЕНТГЕНОВСКОМ РЕЖИМЕ НЕЦИЛИНДРИЧЕСКОГО Z-ПИНЧА**

*К. Г. Гуреев, В. С. Имшенник, Я. М. Каждан,
Н. И. Куранчева, Л. А. Плинер, Т. И. Филиппова,
Н. В. Филиппов*

(Москва)

Одним из проявлений взаимодействия плазмы с электродами в мощных электрических разрядах типа нецилиндрический Z-пинч является тыльный откол анода. Возможность использования этого явления как дополнительного средства диагностики плазмы разряда обнаружена сравнительно давно. Однако первые же теоретические исследования [1] показали, что наблюдаемые экспериментально отколы не могут быть обусловлены недостаточной высотой для этого термодинамическим давлением собственно пинча на поверхность анода. В работе [2] осуществлена попытка объяснить откол образованием в плазме разряда электронного пучка и воздействием его на анод. Режим нецилиндрического Z-пинча, в котором наблюдаются отколы, назван рентгеновским. Позднее подтвердилось, что в рентгеновском режиме в конечной стадии разряда не образуется плотного высокотемпературного пинча, а генерируется электронный пучок, переносящий практически весь ток системы ~ 1 МА и создающий мощное рентгеновское излучение с поверхности анода. Одновременно за счет диссипации энергии электронов в материале анода происходит его интенсивное испарение, сопровождающееся импульсным давлением на анод $\sim 10^6$ атм. Весь комплекс явлений, характерных для рентгеновского режима нецилиндрического Z-пинча, описан в [3], где также показано, что давление на поверхности анода можно довольно точно связать с энергетическими параметрами пучка. Возможность определения давления на анод и получения независимой диагностики электронного пучка в нецилиндрическом Z-пинче дала новый толчок изучению откола.

В работе [4] на основании экспериментальных измерений рентгеновского излучения, а также принятой модели ускорения электронов были восстановлены временные энергетические характеристики электронных пучков, образующихся в ряде различных разрядов в рентгеновском режиме, и по ним построены кривые зависимости от времени давления на