

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА  
ИНИЦИИРУЮЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ  
ИМПУЛЬСАМИ ЭЛЕКТРОНОВ  
МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

УДК 541.15:662.413:662.415.3

**С. М. Рябых, В. П. Жуланова, Н. В. Холодковская,  
В. Г. Шаховалов**

**Кемеровский государственный университет, 650043 Кемерово**

*В работе изучалось взрывное разложение инициирующих взрывчатых веществ: азидов свинца, серебра, кадмия, таллия, пикрата калия, стифната свинца, фульмината ртути, тетразена при облучении импульсами электронов разной длительности. Определены критические параметры электронных импульсов, инициирующих взрыв образцов. Показано, что критическая плотность энергии в импульсе при облучении импульсами микросекундной длительности меньше, чем при облучении наносекундными импульсами. Уменьшение температуры облучаемых образцов до  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  не вызывает изменения параметров критического импульса. Предложен механизм инициирования взрыва импульсом электронов как результат концентрирования электронных возбуждений и образования очага инициирования.*

Возбуждение взрыва инициирующих взрывчатых веществ (ИВВ) импульсами излучения — одна из актуальных проблем физики взрыва. В достаточно полно изученных процессах возбуждения взрыва ИВВ лазерными импульсами [1, 2] обнаружены два странных явления: во-первых, взрыв большинства ИВВ инициировался при плотностях энергии в импульсе  $H$  от 0,01 до (2–3) Дж/см<sup>2</sup>, чего явно недостаточно для разогрева поглощающего слоя до температуры вспышки; во-вторых, плотность энергии в импульсе, необходимая для возбуждения взрыва, сильно зависела от длительности импульса: для наносекундной длительности она составляла (0,01–0,1) Дж/см<sup>2</sup>, а в случае микросекундных импульсов возрастала до (2–3) Дж/см<sup>2</sup>. Для объяснения первого явления было предположено [1], что в кристаллах ИВВ имеются сильно поглощающие включения сажных частиц или коллоидного металла — продукты разложения самого ИВВ, которые при воздействии лазерного импульса разогреваются до высокой температуры и зажигают ИВВ. Второе явление все-сторонне не обсуждалось. В серии работ по возбуждению взрыва двух типичных ИВВ — азида серебра и азида свинца — импульсами быстрых электронов наносекундной длительности [3, 4] установлено, что критическая плотность энергии в импульсе составляет  $\sim 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>, т. е. близка к таковой в случае лазерного инициирования.

Однако приведенный выше механизм зажигания ИВВ сильно поглощающими посторонними включениями при воздействии быстрых электронов не применим в принципе, так как быстрые электроны, в отличие от света, поглощаются с мало отличающейся эффективностью и матрицей ИВВ, и посторонними включениями. Кроме того, как было показано в [5], понижение температуры ИВВ до  $-77\text{ }^{\circ}\text{C}$  не приводит к сколько-нибудь заметным из-

менениям значений критической плотности энергии в импульсе. Совокупность этих фактов приводит к мысли о том, что возбуждение взрыва ИВВ импульсами быстрых электронов носит нетермический характер. В качестве возможной модели образования очага иницирования предложена коагуляция генерируемых излучением электронных возбуждений с образованием электронно-дырочной капли [5]. В данной работе изучалось взрывное разложение ряда ИВВ при облучении импульсами электронов разной длительности.

**Методика эксперимента.** Облучение проводилось в двух режимах. В первом ИВВ облучали единичными импульсами на сильноточном ускорителе электронов (энергия электронов  $E = 250 \div 300$  кэВ, плотность тока  $(0,1 \div 1) \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>, длительность импульса тока пучка электронов по основанию  $(10 \div 30) \cdot 10^{-9}$  с, интервал между импульсами 30 с). Плотность энергии в импульсе изменялась от 0,01 до 0,1 Дж/см<sup>2</sup>, мощность поглощенной дозы  $P \approx (10^5 \div 10^6)$  МГр/с. Исследуемые вещества прессовали в таблетки диаметром  $d = 4,8$  мм под давлением  $(4 \div 8) \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>. Толщина таблетки превышала экстраполированный пробег электронов в 3 раза. В другом режиме ИВВ облучали на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-4 пучком импульсов ( $E = 250$  кэВ, средний ток электронного пучка  $10^{-3}$  А, длительность импульса тока пучка электронов по полуширине  $(4,5 \div 5) \cdot 10^{-6}$  с, интервал между импульсами  $5 \cdot 10^{-3}$  с). Значение плотности энергии в импульсе менялось в интервале  $(0,35 \div 8) \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>,  $P \sim (1 \div 20)$  МГр/с. Вещества прессовали в таблетки  $d = 4,8$  мм, давление прессования  $10^8$  Н/м<sup>2</sup>, толщина таблетки равнялась экстраполированному пробегу электронов.

Для дозиметрии использовался порошок нитрата калия, запрессованный в таблетки толщиной, обеспечивающей полное поглощение электронов. Изучалось взрывное разложение азидов свинца, серебра, кадмия, таллия; пикрата калия, стифната свинца, фульмината ртути, тетразена.

**Результаты и обсуждение.** При облучении «короткими» импульсами электронов (длительность импульса  $t \approx 10^{-9}$  с много меньше времени жизни возбужденных состояний  $\tau \sim 10^{-6}$ , определенного для азидов тяжелых металлов в [6]) получены значения критической плотности энергии в импульсе, инициирующем взрыв образцов,  $H_* = 0,07$  Дж/см<sup>2</sup> для азид свинца (PbN<sub>6</sub>) и азид серебра (AgN<sub>3</sub>) и 0,1 Дж/см<sup>2</sup> для азид кадмия (CdN<sub>6</sub>).

В опытах с импульсами микросекундной длительности при  $H = H_*$  взрывалось 100% образцов, но с большим разбросом времени задержки  $t_*$ , которое уменьшается по мере увеличения плотности энергии (рис. 1). В случае облучения импульсами наносекундной длительности при достижении критического значения взрыв образцов носит вероятностный характер и вероятность взрыва увеличивалась по мере увеличения плотности энергии в импульсе.

Иницировать взрыв азид таллия, пикрата калия, тетразена, стифната свинца не удалось. Не взрывался и фульминат ртути при  $H = 0,02$  Дж/см<sup>2</sup>.

Таким образом, при облучении импульсами электронов длительностью  $\sim 10^{-9}$  с и  $H \leq 1$  Дж/см<sup>2</sup> взрывное разложение претерпевают только азиды и чувствительность веществ увеличивается в ряду  $CdN_6 < PbN_6 < AgN_3$ .

При облучении «длинными» импульсами электронов ( $t_1 \gg \tau$ ) удалось иницировать взрыв и других исследуемых веществ. На рис. 1 показано изменение  $t_*$  в зависимости от  $P$ , а в табл. 1 приведены значения плотности энергии в импульсе  $H$ , при которой происходит иницирование взрыва, мощности  $P$  и поглощенной дозы  $D$ , полученной образцом к моменту иницирования взрыва. Здесь  $D = 200Pt_1t_*$ , 200 — частота следования импульсов, 1/с;  $t_1$  — длительность микросекундного импульса, с;  $t_*$  — время облучения до взрыва, с.

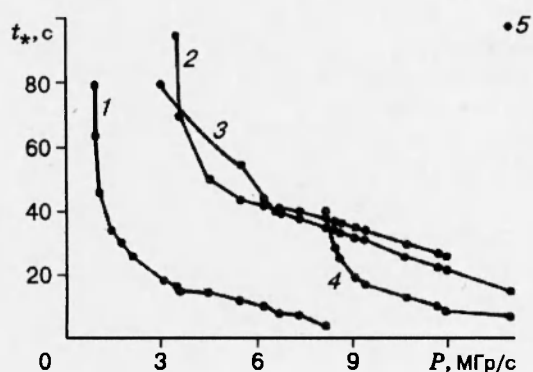


Рис. 1. Зависимость изменения времени задержки взрыва от мощности поглощенной дозы при облучении электронным импульсом микросекундной длительности:

1 — фульминат ртути, 2 — азид кадмия, 3 — стифнат свинца, 4 — азид свинца, 5 — азид серебра

Таблица 1

Критические значения параметров иницирующего импульса электронов микросекундной длительности и поглощенной дозы, полученной к моменту взрыва ИВВ

Вещество	$H$ , Дж/см <sup>2</sup>	$t_*$ , с	$P$ , МГр/с	$D \cdot 10^{-4}$ , Гр
Фульминат ртути	$3,5 \cdot 10^{-3}$	63	1	5,5
	$1,3 \cdot 10^{-2}$	15	3,5	4,8
	$2,8 \cdot 10^{-2}$	5	7,5	3,4
Азид кадмия	$1,2 \cdot 10^{-2}$	120	3	30
	$3 \cdot 10^{-2}$	40	7	25
	$5 \cdot 10^{-2}$	22	12	23
Стифнат свинца	$1,3 \cdot 10^{-2}$	80	3	23
	$3 \cdot 10^{-2}$	40	7,5	27
	$5 \cdot 10^{-2}$	25	12	28
Азид свинца	$3 \cdot 10^{-2}$	40	8	30
	$4 \cdot 10^{-2}$	12	11	11
	$5 \cdot 10^{-2}$	7	14	8
Азид серебра	$8 \cdot 10^{-2}$	100	21	171

Из приведенных результатов видно, что фульминат ртути наиболее чувствителен к воздействию электронного облучения в режиме микросекундных импульсов. Иницировать взрыв азид серебра не удалось ни при длительном облучении в режиме, где происходит взрыв азид свинца, ни при более чем двукратном увеличении плотности энергии в импульсе. Таким образом, при облучении импульсами электронов длительностью  $4,5 \cdot 10^{-6}$  с чувствительность ИВВ увеличивается:  $\text{AgN}_3 < \text{CdN}_6 < \text{PbN}_6 < \text{PbC}_6\text{HO}_2(\text{NO}_2)_3 < \text{HgC}_2\text{N}_2\text{O}_2$ .

Полученные данные по изменению ряда чувствительности коррелируют с результатами по действию лазерного излучения [2].

Итак, при облучении электронными импульсами микросекундной длительности критическая плотность энергии в импульсе, инициирующем взрыв, меньше, чем при облучении импульсами наносекундной длительности. При увеличении  $P$  уменьшается  $t_*$ , в то время как величина поглощенной дозы, полученной веществом к моменту взрыва, при разных плотностях энергии в импульсе практически не меняется. Как видно из табл. 1, это утверждение справедливо для всех изучаемых ИВВ, кроме азид свинца.

При измерении температуры образца во время облучения получено максимальное значение  $110^\circ\text{C}$ , что явно недостаточно для инициирования взрыва. При уменьшении температуры до  $-80^\circ\text{C}$  образцы взрывались. Для азид кадмия время задержки взрыва

Таблица 2

Критическая плотность электронного импульса  
и время задержки взрыва таблеток фульмината ртути  
массой  $m$  при низких температурах облучения

$m$ , г	$P$ , МГр/с	$H \cdot 10^2$ , Дж/см <sup>2</sup>	$T$ , °С	$t_*$ , с
0,135	5,5	1,8	20	16
0,125	6,5	2,2	20	12
0,114	7,0	2,4	20	10
0,125	7,5	2,5	20	10
0,137	7,7	2,5	-28	22
0,138	7,7	2,5	-54	27
0,137	4,5	1,5	-79	83
0,141	7,0	3,3	-81	25
0,135	4,5	1,5	-82	52

ва изменилось на несколько секунд при изменении температуры образца от 20 до  $-80$  °С, для фульмината ртути с уменьшением температуры увеличивалось время задержки взрыва. Критические параметры электронного импульса при иницировании взрыва образцов фульмината ртути приведены в табл. 2.

В работе [5] для азидов тяжелых металлов предложен механизм иницирования импульсом электронов как результат концентрирования генерированных излучением электронных возбуждений и образования в итоге «электронно-дырочных кристаллонов», где возможно начало цепного химического разложения. Развивая эту теорию на другие ИВВ и сопоставляя результаты иницирования взрыва при разных условиях облучения, можно в качестве гипотезы предложить следующее объяснение полученных результатов. Считаем, что при облучении «короткими» импульсами электронные возбуждения образуются практически мгновенно и начальная концентрация электронных возбуждений  $c_0 = GH$ , где  $G$  — выход генерации электронных возбуждений.

Максимальная концентрация электронных возбуждений в очаге иницирования, образованных за импульс,

$$n_{\max} = k_1 \tau GH, \quad (1)$$

где  $k_1$  — константа захвата электронных возбуждений растущим очагом.

При облучении «длинным» импульсом очаг формируется при существовании стационарной концентрации электронных возбуждений  $c_{st} = GI\tau$ , где  $I = H/t_1$  — плотность мощности энергии в импульсе.

В данном случае концентрация электронных возбуждений в очаге иницирования

$$n = \frac{k_1 c_{st}}{k_2} (1 - \exp(-k_2 t)), \quad (2)$$

где  $k_2$  — константа испарения электронных возбуждений из очага иницирования, и при  $t \rightarrow \infty$

$$n_{\max} = \frac{k_1 \tau GH}{k_2 t_1}. \quad (3)$$

При облучении цугом «длинных» импульсов, следующих друг за другом с интервалом  $t_2$ , концентрация электронных возбуждений к концу первого импульса определяется формулой (2). При медленном распаде очага иницирования, когда характерное время распада

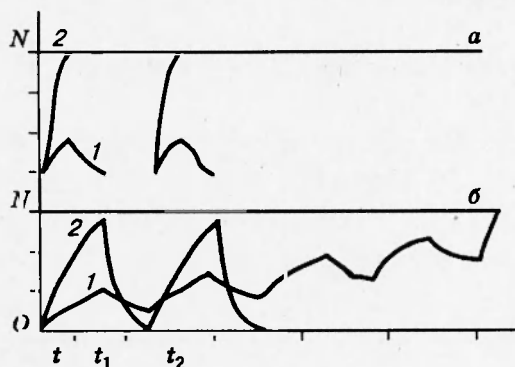


Рис. 2. Изменение концентрации электронных возбуждений во времени при облучении импульсами электронов наносекундной (а) и микросекундной (б) длительностей для фульмината ртути (1) и азида серебра (2)

$1/k_2 \gg t_1$ , имеем  $n_1 = k_1 G I \tau t_1$ .

В случае, когда время распада очага иницирования больше длительности интервала между импульсами ( $1/k_2 \gg t_2$ ),

$$n_{\max} = \frac{k_1 G H I \tau t_1}{k_2 t_2}.$$

Взрыв вещества произойдет в том случае, когда концентрация электронных возбуждений в очаге достигнет некоторой критической величины  $N$ , т. е.  $n_{\max} = N$ . Из этих условий можно определить количество импульсов, необходимое для достижения  $n_{\max}$  в очаге иницирования:

$$i = \frac{\ln(n_1) - \ln(n_1 - N k_2 t_2)}{k_2 t_2}. \quad (4)$$

Тогда время задержки взрыва  $t_* = i(t_1 + t_2)$ .

Считаем, что процессы образования возбужденных состояний и роста очага иницирования в азиде идут более легко, чем в других исследуемых веществах, но имеют малое время жизни. Отсутствие взрыва при облучении  $\text{AgN}_3$  пучком импульсов можно объяснить малой интенсивностью единичного импульса и распадом возбужденных состояний к моменту начала следующего импульса. В более сложных взрывчатых веществах (стифнат свинца, фульминат ртути, пикрат калия) образование и рост очага иницирования идут более медленно, поэтому взрыв отсутствует при облучении единичными «короткими» импульсами, но время жизни этого очага довольно длительное, больше интервала между импульсами при облучении пучком импульсов. Таким образом, происходит постепенное накопление электронных возбуждений до некоторого критического значения (рис. 2), которое будет достигнуто при последовательном воздействии определенного количества импульсов, определяемого по формуле (4).

Сопоставляя критические энергии импульсов при облучении одного вещества «короткими» и «длинными» импульсами, можно определить константу распада очага иницирования данного вещества. Приравнивая выражения для критической концентрации электронных возбуждений в очаге иницирования (1) и (3), получаем

$$N = k_1 \tau G H_1 = \frac{k_1 \tau G H_2}{k_2 t_2},$$

где  $H_1$ ,  $H_2$  — критическая плотность энергии при облучении наносекундными и микросекундными импульсами соответственно, откуда  $k_2 = H_2 / (H_1 t_2)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В. И., Вознюк А. Г. Иницирование азидов свинца лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 4. С. 86–91.
2. Карabanов Ю. Ф., Бобoлев В. К. Зажигание инициирующих взрывчатых веществ импульсом лазерного излучения // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256, № 5. С. 1152.
3. Рябых С. М., Карабукаев К. Ш., Барелко В. В. О многостадийном характере процесса развития взрыва кристаллических азидов серебра и свинца // IV Всесоюз. совещание по детонации: Тез. докл. Телави, 1988. Т. 1. С. 141.
4. Рябых С. М., Долганов В. С. Критерии возбуждения взрыва азидов серебра импульсом излучения // X Симпоз. по горению и взрыву: Тез. докл. Черногoловка, 1992. С. 83–84.
5. Рябых С. М., Барелко В. В., Карабукаев К. Ш. Нетермическое инициирование азидов свинца и серебра импульсом электронов // X Симпоз. по горению и взрыву: Тез. докл. Черногoловка, 1992. С. 78–80.

*Поступила в редакцию 15/І 1994 г.,  
в окончательном варианте — 18/VII 1995 г.*

---