

УДК 662.215.4

Воздействие электронного облучения на кристаллы взрывчатого вещества

**А. М. Злобин, С. А. Вахмистров,
В. Н. Герман, Н. В. Завьялов,
Т. Е. Кирсанова, Т. Г. Кирьянова,
Е. С. Козлова, Л. Е. Корнилова,
А. Л. Михайлов, Ю. П. Орликов,
А. П. Погорелов, В. А. Синицын,
А. К. Фисенко, Ю. В. Шейков**

Цель работы – изучение влияния воздействия электронов с энергией 50 МэВ в интервале поглощенных доз 10–300 Дж/г на внешний вид, структуру и некоторые физико-химические свойства кристаллов тэна, гексогена, октогена с размером кристаллов 250–500 мкм. При исследовании использовали различные экспериментальные методики: оптические (световая и электронная микроскопия), спектрометрические (инфракрасная и масс-спектрометрия), термографическую и манометрическую.

Введение

Представлены результаты исследования воздействия электронов ускорителя ЛУ-50 с энергией 50 МэВ в интервале поглощенных доз 10–300 Дж/г на внешний вид, структуру и некоторые физико-химические свойства кристаллов тэна, гексогена, октогена.

Как известно [1–7], механизм радиационного повреждения ВВ имеет сложный характер. Наряду с процессами, которые могут протекать при воздействии ионизирующих излучений в любом твердом теле (разогрев вещества, повреждение кристаллической решетки с образованием междоузельных атомов, вакансий, областей разупорядочения решетки), ионизирующие излучения способны разрушать химические связи в молекулах ВВ, что приводит к их радиационному разложению (радиолизу). При разогреве происходит термическое разложение и, возможно, воспламенение ВВ. Структурные изменения материала и газообразные продукты разложения могут оказать существенное влияние на основные свойства ВВ.

Постановка экспериментов по воздействию электронов на кристаллы ВВ

Эксперименты по воздействию электронов с энергией 50 МэВ на тэн, гексоген и октоген проводили на ускорителе электронов ЛУ-50 [8]. Параметры электронного пучка, режимы облуче-

* Доклад на китайско-российском семинаре «Энергоемкие материалы: фундаментальные исследования, жизненный цикл, безопасность», г. Н. Новгород, ноябрь 2012 г.

ния, описание защитного контейнера, в котором размещались образцы ВВ, а также схема постановки экспериментов приведены в [9].

В качестве объектов использовали кристаллы гексогена, октогена, тэна с размером 250–500 мкм. Патроны с ВВ размещались в защитном цилиндрическом контейнере. Величину поглощенной дозы варьировали путем изменения времени воздействия электронов на исследуемый образец.

Контролировали следующие параметры исследуемых образцов: внешний вид, молекулярную структуру, термические характеристики, кинетические параметры термического разложения, состав газовой фазы при термическом разложении. Были проведены измерения дозовой зависимости эффекта удержания газообразных продуктов разложения октогена.

Свойства кристаллов тэна, гексогена, октогена до и после воздействия электронов с энергией 50 МэВ

Далее представлены результаты экспериментальных исследований по изменению внешнего вида и некоторых физико-химических характеристик в зависимости от поглощенной дозы в результате воздействия электронов с энергией 50 МэВ на кристаллы гексогена, октогена и тэна.

Микроструктурные исследования кристаллов тэна, гексогена, октогена

Тэн

Внешний вид кристаллов тэна до облучения приведен на рис. 1,а. При облучении тэна (10 Дж/г) некоторые кристаллы остались без видимых изменений, часть кристаллов стала мутной, часть – приобрела молочно-белый цвет (рис. 1,б). При поглощенной энергии 100 Дж/г практически все кристаллы стали молочно-белыми (рис. 1,в). Плавление с разложением наблюдалось на кристаллах тэна при 300 Дж/г. После извлечения из патрона тэн представлял собой пористую, с оттенком бурого цвета спекшуюся массу (рис. 1,г). Местами на ней видны следы обугливания, что свидетельствует о возникновении очагов возгорания. Были обнаружены на металлической поверхности патрона игольчатые кристаллы сублимированного тэна (рис. 1,д).

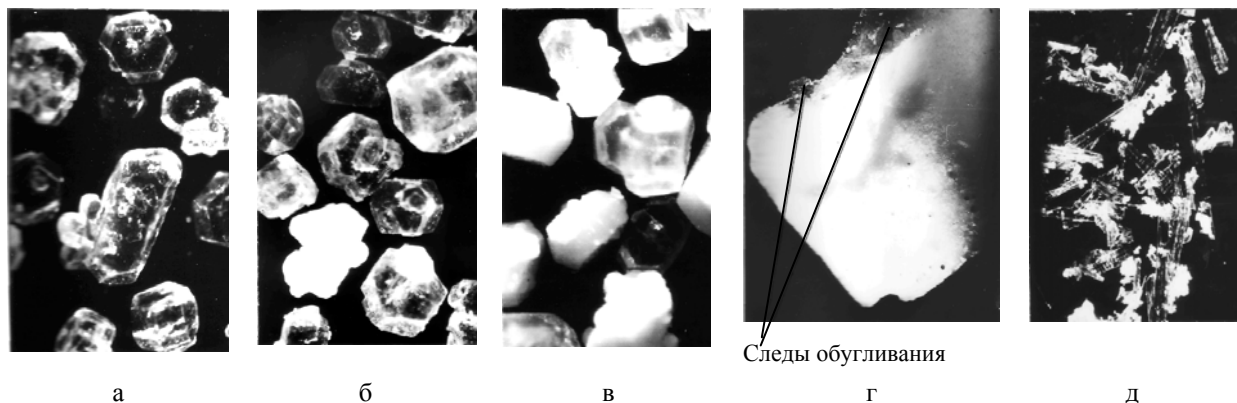


Рис. 1. Кристаллы тэна до (а – 28×) и после облучения (б – $D = 10$ Дж/г – 28×, в – $D = 100$ Дж/г – 28×, г – $D = 300$ Дж/г – 4×, д – кристаллы сублимированного тэна – 14×)

На рис. 2 представлены электронно-микроскопические снимки типичной микроструктуры поверхности кристаллов тэна до (рис. 2,а) и после воздействия электронов. На рис. 2,б видно, что

при поглощенной энергии 10 Дж/г микродефекты более выражены, а также присутствуют многочисленные микропоры размером 1 мкм. При увеличении поглощенной энергии до 100 Дж/г происходит разогрев образца, что приводит к сглаживанию дефектной поверхности кристаллов, отжигу в кристаллах дефектов с образованием зон, свободных от них (рис. 2,в). Дальнейшее увеличение поглощенной энергии до 300 Дж/г, как было сказано выше, приводит к оплавлению кристаллов (рис. 2,г).

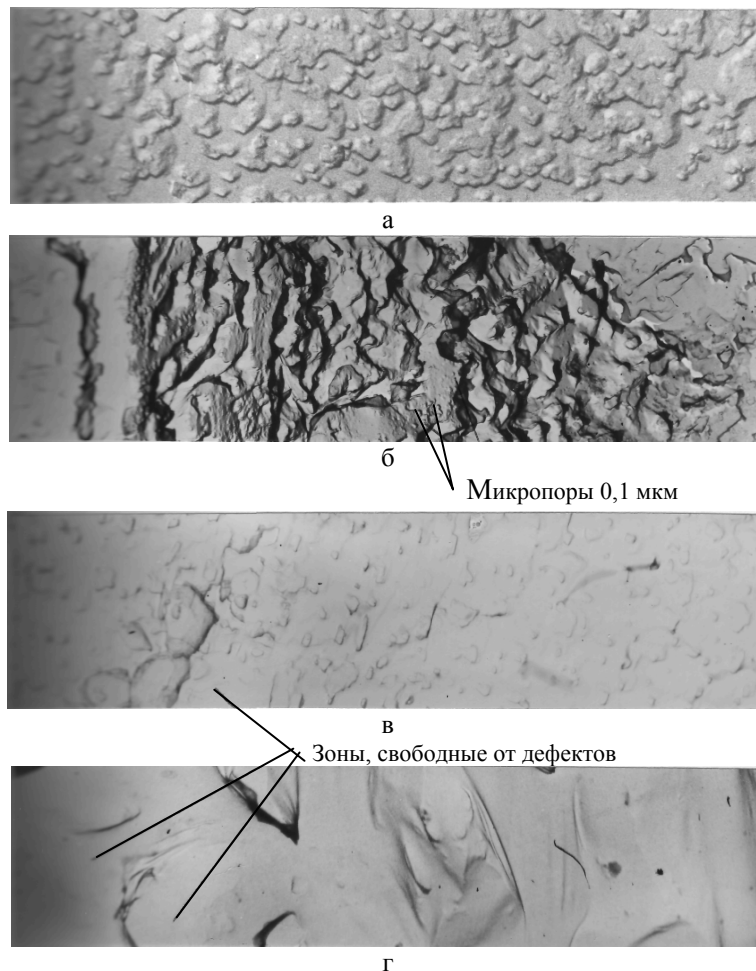


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки поверхности кристаллов тэна до (а) и после облучения (б – 10 Дж/г; в – 100 Дж/г; г – 300 Дж/г). Увеличение 6000×

Гексоген

Внешний вид кристаллов гексогена до и после облучения (рис. 3,а, б) при 10 Дж/г практически не различается. При увеличении поглощенной энергии до 200 Дж/г кристаллы гексогена стали молочно-белыми из-за многочисленных микротрещин и различных микродефектов (рис. 3,в). Дальнейшее повышение поглощенной энергии до 300 Дж/г (рис. 3,г) привело к разрушению кристаллов и превращению их в спекшуюся массу. ВВ имело бурый оттенок. Вероятно, в процессе облучения разогрев кристаллов не только привел к растрескиванию и их спеканию, но и способствовал частичному разложению ВВ.

На рис. 4 представлены электронно-микроскопические снимки поверхности кристаллов гексогена после облучения ($D = 10, 100, 300$ Дж/г). При 10 Дж/г, как следует из сравнения поверхности исходных кристаллов с поверхностью облученных, происходит образование многочисленных микропор размером $\sim 0,1$ мкм. По мере увеличения поглощенной дозы до 100 Дж/г размеры пор возросли на порядок, а при 300 Дж/г – на несколько порядков. Кроме того, границы пор сохранили ясно выраженную форму граней кристалла. Последнее характерно для гексогена.

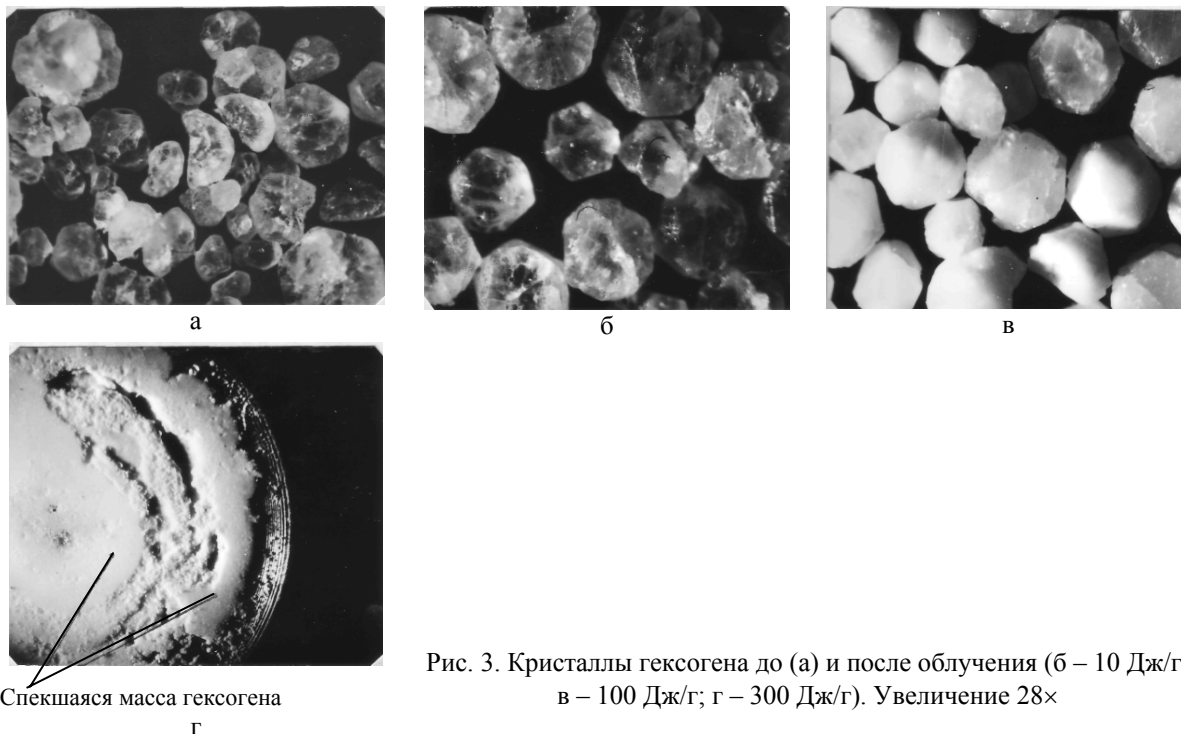


Рис. 3. Кристаллы гексогена до (а) и после облучения (б – 10 Дж/г; в – 100 Дж/г; г – 300 Дж/г). Увеличение 28 \times

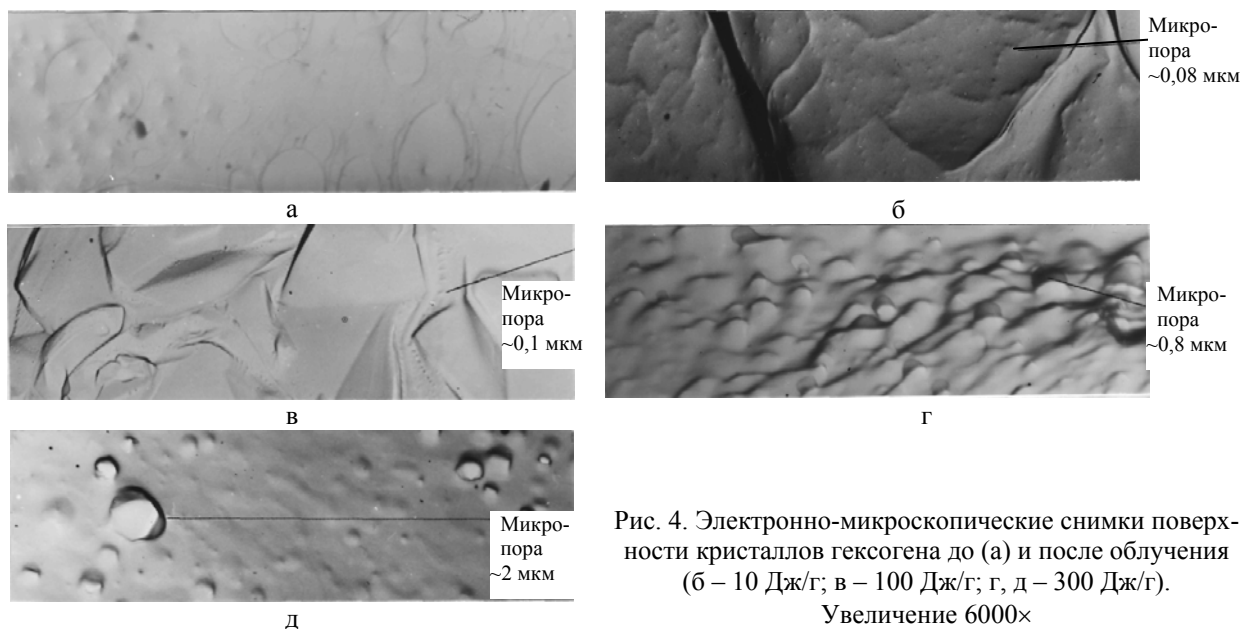


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки поверхности кристаллов гексогена до (а) и после облучения (б – 10 Дж/г; в – 100 Дж/г; г, д – 300 Дж/г). Увеличение 6000 \times

Октоген

Фото кристаллов октогена до и после воздействия приведены на рис. 5. Внешний вид кристаллов октогена при облучении 10 Дж/г практически не изменился. При поглощенной энергии 300 Дж/г лишь отдельные кристаллы не претерпели видимых изменений. Единичные кристаллы, в большинстве своем молочно-белые, имеют сколы и трещины. Основная же часть кристаллов – агломераты в виде спекшихся молочно-белых кристаллов, чешуек, плотной спекшейся массы октогена, образовавшейся на стенках контейнера.

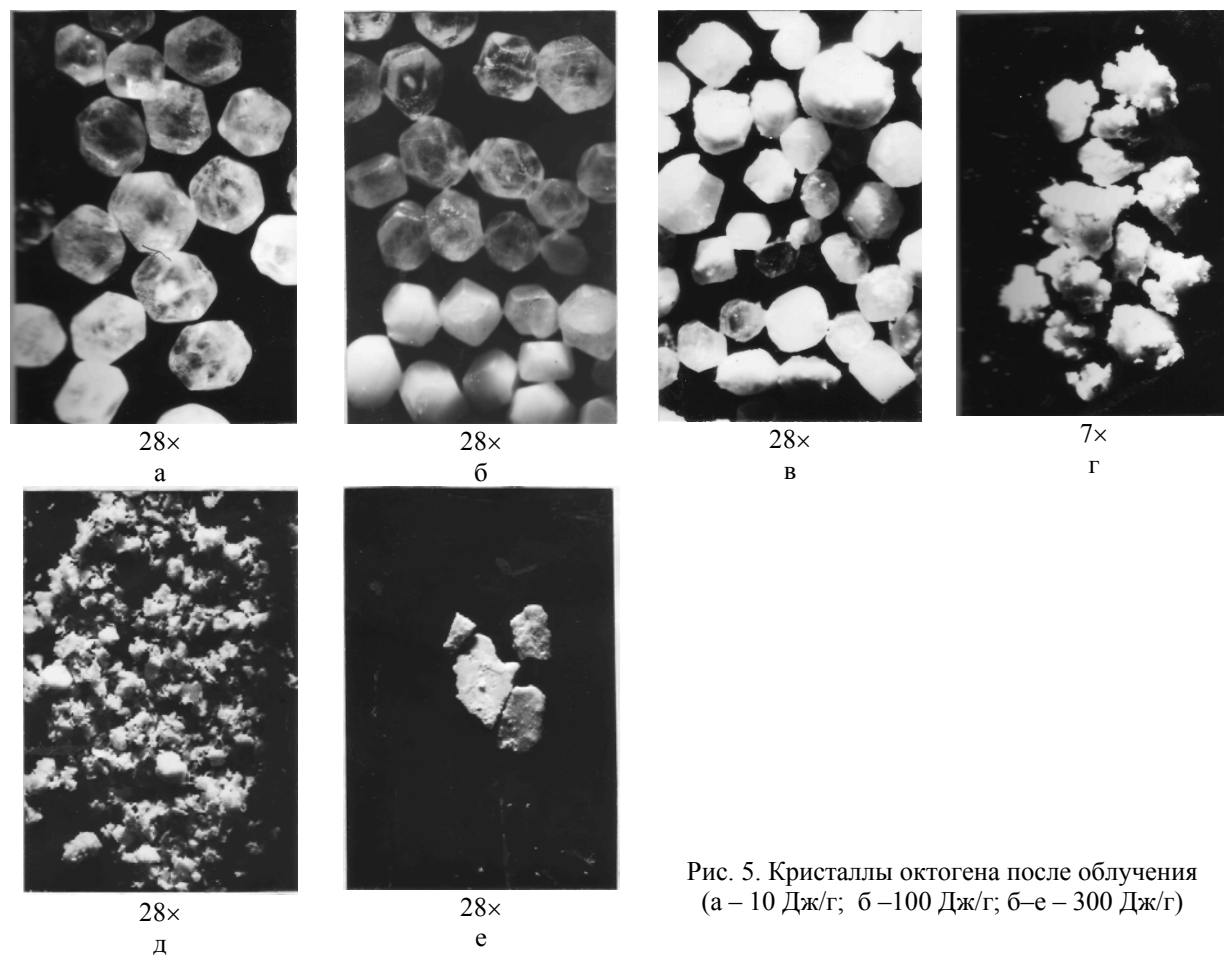


Рис. 5. Кристаллы октогена после облучения (а – 10 Дж/г; б – 100 Дж/г; в – е – 300 Дж/г)

Анализ электронно-микроскопических снимков с поверхности кристаллов октогена (рис. 6) показал следующее. При поглощенной дозе 10 Дж/г на отдельных участках кристалла (внешне она при этой энергии не отличается от исходных) появились линии скольжения и микропоры. Размер последних существенно меньше, чем в аналогичных условиях у тэна и гексогена (рис. 6,а). Рост размеров микропор кристаллов по мере увеличения дозы от 100 до 300 Дж/г (рис. 6,б,в) незначителен. Наличие дефектов в кристаллах октогена в виде краевых дислокаций, пор и трещин привело к потере их прозрачности и приобретению белого цвета. При энергии 300 Дж/г кристаллы разрушились. Кроме того, ввиду разогрева кристаллов в момент облучения происходит частичный отжиг кристаллов (по аналогии с гексогеном и тэном), при котором микродефекты как бы «залечиваются» и появляются зоны, свободные от дефектов.

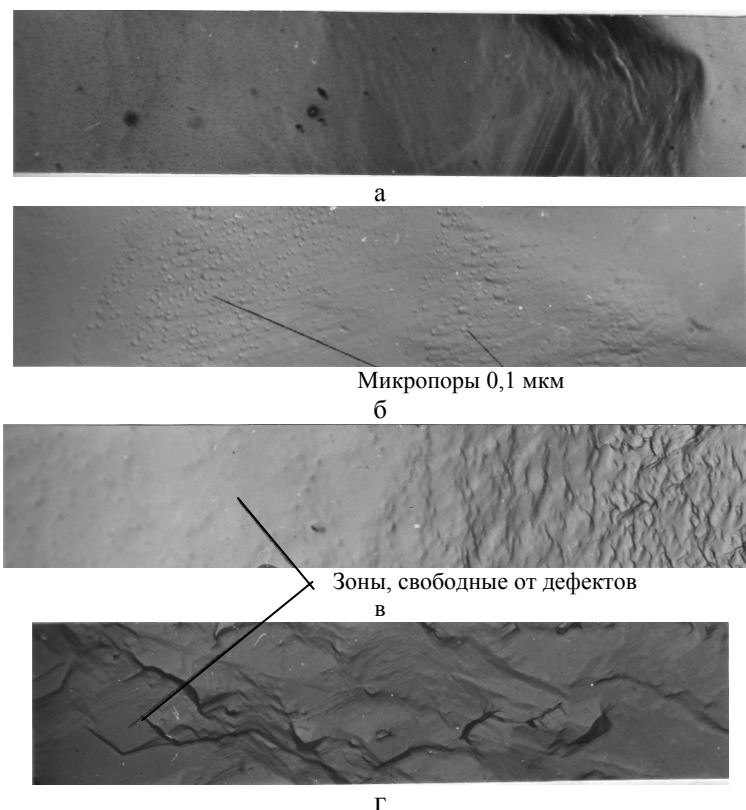


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки поверхности кристаллов октогена после облучения (а – 10 Дж/г; б – 100 Дж/г; в, г – 300 Дж/г). Увеличение 6000×

Появление блочных структур при данной величине поглощенной энергии связано не только с отжигом, но и, с большой вероятностью, с полиморфными превращениями в кристаллах октогена (рис. 6,г).

Облучение электронами кристаллов тэна, гексогена, октогена (10–300 Дж/г) привело к тому, что кристаллы ВВ растрескались, разрушились, спеклись в прочные агломераты. Характерным для данных ВВ является порообразование в процессе облучения. Особенно это выражено у гексогена. При облучении $D = 100$ и 300 Дж/г границы микропор сохранили форму граней кристаллов.

Исследование молекулярной структуры ВВ

Цель исследований – изучение методом ИК-спектроскопии структурных изменений (на молекулярном уровне), происходящих в ВВ после облучения электронами высоких энергий. ИК-спектры ВВ снимали на спектрофотометре ИКС-24 в области длин волн $4000\text{--}450\text{ см}^{-1}$. О характере изменений судили путем сравнения полученных ИК-спектров с соответствующими спектрами исходных веществ. Объекты исследования: кристаллы тэна с $D = 160, 300$ Дж/г, гексогена с $D = 100$ Дж/г, октогена с $D = 10, 100, 300$ Дж/г.

Анализ ИК-спектров исходных и облученных тэна и гексогена показал, что структурных изменений в ВВ не наблюдается [10]. Особо следует остановиться на образцах октогена. При исследовании молекулярной структуры кристаллов октогена, облученных электронами, были получены следующие результаты (рис. 7).

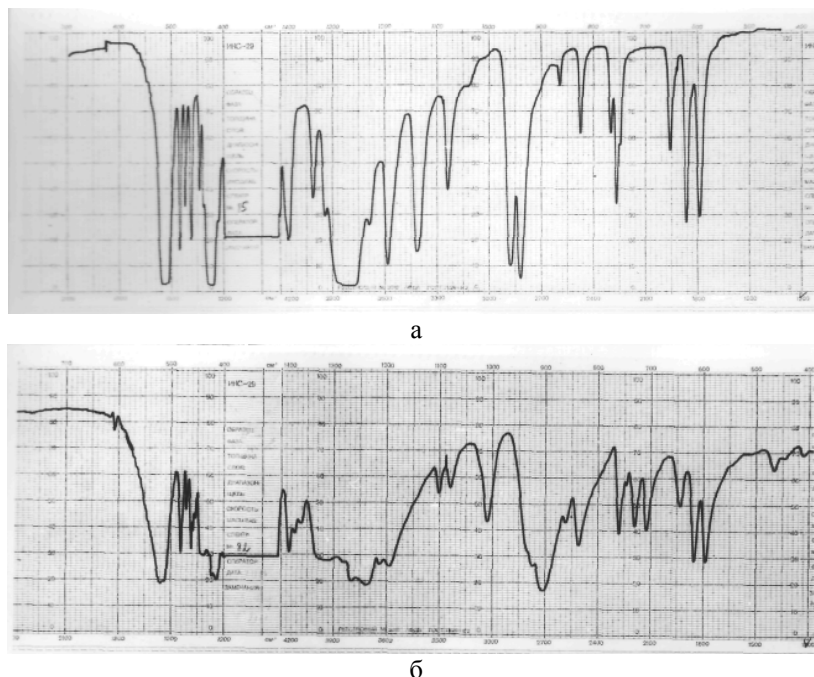


Рис. 7. ИК-спектры кристаллов октогена после облучения (а – $D = 10$ Дж/г, б – $D = 300$ Дж/г)

Октоген при 300 Дж/г из β -формы перешел в δ -форму. ИК-спектр был снят примерно через 2 ч после облучения и через сутки. При величине поглощенной энергии 10 и 100 Дж/г полиморфных превращений в кристаллах октогена не зафиксировано (ИК-спектры были сняты в течение суток).

Физико-химические свойства ВВ

Изменение под воздействием электронного пучка структуры изучаемых ВВ может привести к изменению их физико-химических свойств, о котором судят по результатам термогравиметрического и манометрического методов исследований.

Термогравиметрические исследования. С целью изучения изменения некоторых термических характеристик (температуры плавления, полиморфного превращения, температуры начала интенсивного разложения, изменения массы вещества) исследуемых ВВ был проведен термогравиметрический анализ образцов на дериватографе системы Паулик. Анализ проводили в неизотермических условиях нагрева в интервале температур 20–500 и 20–1000 °С, со скоростью нагрева $\sim 10^\circ/\text{мин}$. Масса образца ~ 0.05 г. Объекты исследования: кристаллы тэна с $D = 160, 300$ Дж/г, гексогена с $D = 100$ Дж/г, октогена с $D = 10, 100, 300$ Дж/г. Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Из таблицы следует:

- для тэна при 100–300 Дж/г характерно уменьшение температуры плавления и температуры интенсивного разложения на ~ 10 °С;
- для гексогена характерно при 100 Дж/г уменьшение температуры плавления и температуры интенсивного разложения на ~ 18 и 8 °С, соответственно;
- для октогена в интервале поглощенных доз 100–300 Дж/г температура полиморфного превращения и температура начала интенсивного разложения уменьшаются на ~ 5 °С.

Таблица 1

Термические характеристики тэна, гексогена, октогена до и после облучения электронами

ВВ	D, Дж/г	Интервал плавления $\Delta T_{пл}$, °С, и полиморфного перехода для октогена $\Delta T_{пш}$, °С	Температура начала интенсивного разложения $T_{нир}$, °С	Температурный интервал (ΔT) убыли массы (Δm) в период разложения ВВ	
				ΔT , °С	Δm , %
Тэн	0	132–144	162	162–214	98
	160	125–138	155	155–210	94
	300	122–138	152	152–212	95
Гексоген	0	188–198	198	198–240	94
	100	170–195	190	190–235	93
Октоген	0	170–180	260	260–300	95
	100	173–180	259	259–292	95
	300	165–173	255	255–292	93

Таким образом, электронное облучение приводит к уменьшению температуры плавления исследуемых ВВ и температуры начала их интенсивного разложения. Следует отметить снижение температуры полиморфного превращения октогена, что может быть объяснено образованием другой формы октогена.

Манометрические исследования. В табл. 2 приведены результаты определения кинетических параметров уравнения Аррениуса (K – константа скорости реакции и E – энергия активации реакции термораспада) исследуемых ВВ до и после облучения с использованием ИВК «Вулкан-В» [11]. Пробы вещества помещали в реакционную камеру ПП (степень заполнения $2 \cdot 10^{-2}$ г/см³), вакуумирование проводили до остаточного давления 10 мм рт. ст. и герметизировали, затем помещали в термостаты при заданной температуре.

Таблица 2

Кинетические параметры ВВ до и после облучения

ВВ	Температура опыта T , °С	Поглощенная энергия D , Дж/г	Константа скорости разложения K , с ⁻¹	Энергия активации E , кал/моль (Дж/г)
Тэн	135	0	$2,62 \cdot 10^{-7}$	37800 (158,1)
		100	$7,73 \cdot 10^{-7}$	37000 (154,8)
		200	$1,76 \cdot 10^{-6}$	36300 (151,9)
		300	$2,25 \cdot 10^{-6}$	36100 (151,0)
Гексоген	180	0	$3,96 \cdot 10^{-7}$	41700 (174,4)
		50	$1,12 \cdot 10^{-6}$	40800 (170,7)
		100	$6,97 \cdot 10^{-6}$	39100 (163,5)
Октоген	200	0	$4,44 \cdot 10^{-7}$	43400 (181,6)
		100	$6,28 \cdot 10^{-7}$	43100 (180,3)
		200	$1,64 \cdot 10^{-6}$	42200 (176,6)
		300	$2,22 \cdot 10^{-6}$	41900 (175,3)

Как видно из табл. 2, кинетические параметры реакции термораспада исследуемых ВВ в разной степени зависят в исследованной области воздействия от поглощенной энергии. Увеличение значения поглощенной энергии приводит к уменьшению энергии активации и росту константы скорости термического разложения, что характеризует снижение показателя термостойкости веществ и повышение их реакционной способности.

Выход газообразных продуктов разложения из облученных образцов октогена

При исследовании зависимости физико-химических характеристик конденсированных ВВ от воздействий ионизирующих излучений важную роль играет учет газообразных продуктов разложения ВВ. Значительная часть этих продуктов может оказаться задержанной в решетке и влиять на структуру, механические и термодинамические характеристики ВВ вследствие образования микропор, роста трещин, разрыва кристаллов на моноблоки и т. д. [9, 12–14]. В связи с этим представляет значительный интерес информация о скорости выделения и составе газообразных продуктов радиолиза и термического разложения ВВ.

На рис. 8 представлены полученные экспериментально зависимости давления выделившихся из образцов октогена газов от времени выдержки в термостате и поглощенной дозы [9]. На основании полученных результатов измерений выхода из образцов октогена газообразных продуктов радиолиза и термического разложения можно сделать следующие выводы:

- в диапазоне времен выдержки в термостате $t \sim 10^2\text{--}10^3$ с зависимость от времени массы вышедших из образцов газов $m_g^{out}(t)$ близка к линейной;
- с увеличением поглощенной дозы масса вышедших газов при одном и том же времени выдержки существенно возрастает;
- угол наклона графика $m_g^{out}(t)$ возрастает с увеличением поглощенной дозы.

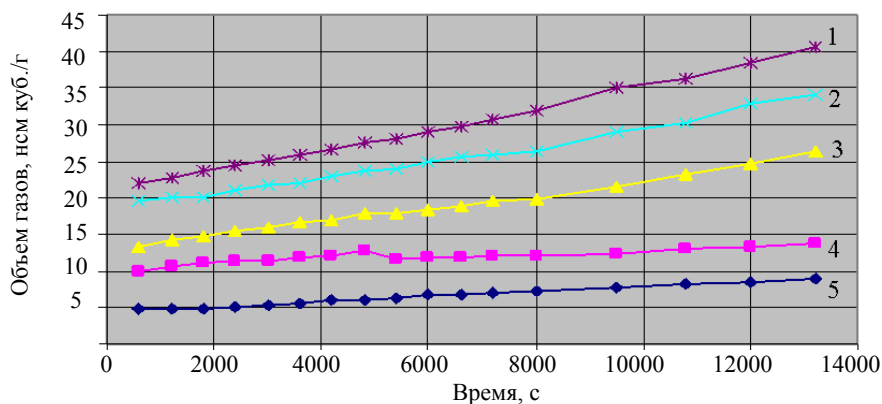


Рис. 8. Зависимости давления выделившихся из октогена газов от времени выдержки при температуре 200 °С и поглощенной дозы [4]: 1 – $D = 280$ Дж/г; 2 – $D = 200$ Дж/г; 3 – $D = 100$ Дж/г; 4 – $D = 50$ Дж/г; 5 – исходный образец: —♦— — исх.; —■— — 50 Дж/г; —▲— — 100 Дж/г; —×— — 200 Дж/г; —*— — 280 Дж/г

Указанные основные черты процессов, связанных с выходом газов из облученных образцов октогена, можно описать, используя решение уравнения баланса, учитывающего как генерацию газообразных продуктов при радиолизе и термическом разложении ВВ при термовыдержке, так и выход газа из образца. Масса $m_g^{out}(t)$ газа, вышедшего из объема ВВ за время t нахождения в термостате облученного образца, может быть представлена в следующем виде:

$$m_g^{out}(t) = (\xi\eta_D m_0 - m_g^z)(1 - e^{-t/\tau}) + \frac{(1 - \eta_D)m_0}{-k_T + \frac{1}{\tau}} \left[-k_T(1 - e^{-t/\tau}) + \frac{1}{\tau}(1 - e^{-k_T t}) \right], \quad (1)$$

где m_0 – начальная масса ВВ; η_D – степень радиационного разложения ВВ после облучения его дозой D ; ξ – относительная доля газовой фазы в продуктах радиолиза ВВ; k_T – константа термического разложения ВВ; τ – характерное время выхода газов, находящихся в материале ВВ (оно зависит от типов наполнителя и связующего, температуры, размеров зерна, концентрации дефектов и т. д.); m_g^z – остаточная масса газа, задержанного в кристаллической решетке (так называемые заклиненные газы, остающиеся в материале при данной температуре T при $t \rightarrow \infty$).

Формула (1), как легко убедиться, правильно описывает предельные случаи по времени наблюдения

$$\begin{aligned} m_g^{out}(0) &= 0, \\ m_g^{out}(t \rightarrow \infty) &= (1 - \eta_D)m_0 + \xi\eta_D m_0 - m_g^z. \end{aligned} \quad (2)$$

Второе равенство в (2) означает, что асимптотически, при полном термическом разложении ВВ, из материала выходят все образовавшиеся газообразные продукты радиолиза и термического разложения, за исключением «заклиненных» газов m_g^z , оставшихся в твердых продуктах разложения.

В условиях наших экспериментов времена выдержки в термостате облученных образцов t были малы по сравнению с характерным временем термического разложения $(k_T)^{-1}$, т. е. выполнялось неравенство $k_T t \ll 1$. Можно показать, что линейные зависимости, представленные на рис. 8, имеют место, если характерное время выхода газов из образцов при температуре термостата существенно меньше времени выдержки ВВ в термостате, т. е. выполняется условие: $\tau \ll t$. В этом случае, согласно (1), зависимость массы вышедших из образцов газов $m_g^{out}(t)$ примет вид

$$m_g^{out}(t) \approx [\xi\eta_D m_0 - m_g^z - (1 - \eta_D)m_0 k_T \tau] + (1 - \eta_D)m_0 k_T t. \quad (3)$$

Полагая, что «заклиненная» масса m_g^z газа, задержанного в кристаллической решетке, мала по сравнению с массой октогена, подвергнутого радиолизу и термическому разложению за время наблюдения, получим линейный рост со временем массы газов, вышедших из объема ВВ, с углом наклона

$$\operatorname{tg} \alpha = (1 - \eta_D)m_0 k_T. \quad (4)$$

Видно, что дозовая зависимость угла наклона графика $m_g^{out}(t)$ определяется произведением двух величин: $(1 - \eta_D)k_T$. В условиях наших экспериментов степень радиационного разложения ВВ мала, т. е. $\eta_D \ll 1$, и поэтому первый множитель в указанном произведении изменяется слабо. Отсюда следует, что если в эксперименте наблюдается существенная зависимость угла наклона кривой $m_g^{out}(t)$ от поглощенной дозы, то, согласно рассматриваемой модели, это может быть связано с дозовой зависимостью коэффициента термического разложения $k_T(D)$.

Действительно, в соответствии с результатами измерений [9], энергия активации термического разложения октогена снижается с увеличением поглощенной дозы. Это приводит к возрастанию коэффициента термического разложения k_T с увеличением дозы. Отсюда следует возрастание угла наклона временной зависимости $m_g^{вв\text{шт}}(t)$ с увеличением дозы, а кроме того, имеет ме-

сто увеличение массы вышедших газов с возрастанием поглощенной дозы вследствие радиолита (при одном и том же времени выдержки), что качественно согласуется с экспериментальными данными по выходу газов из облученных образцов (рис. 8).

Для количественного сравнения экспериментальной и расчетной зависимости наклона кривых от поглощенной дозы введем параметр ξ , характеризующий отношение тангенсов угла наклона для облученного и необлученного образца:

$$\xi_{th} = \frac{\operatorname{tg}\alpha(D)}{\operatorname{tg}\alpha(0)} \Big|_{theor} = (1 - \eta_D) \frac{k_T(D)}{k_T(0)} > 1. \quad (5)$$

Сравнение экспериментального и теоретического значений этого параметра ξ_{exp} и ξ_{th} показывает, что они неплохо согласуются друг с другом. Например, для поглощенной дозы $D = 280$ Дж/г они равны

$$\xi_{exp} \approx 5,3, \quad \xi_{th} \approx 4,0. \quad (6)$$

Здесь для оценки ξ_{th} использовались измеренные в [9] значения константы скорости термического разложения октогена k_T для необлученного образца при температуре 200 °С и облученного образца с поглощенной дозой $D = 280$ Дж/г.

Заключение

В результате воздействия электронов с энергией 50 МэВ в интервале поглощенных доз 10–300 Дж/г на кристаллы тэна, гексогена, октогена установлено:

- исследуемые кристаллы ВВ в зависимости от поглощенной дозы из прозрачных становятся молочно-белого цвета, имеются сколы и трещины, образуются агломераты гексогена и октогена; зафиксированы микропоры кристаллов (~0,1–2 мкм), что характерно особенно для гексогена;
- отсутствуют изменения молекулярной структуры тэна при 160 и 300 Дж/г, гексогена при 100 Дж/г, октогена при 10 и 100 Дж/г; кристаллы октогена претерпевают полиморфное превращение $\beta \Rightarrow \delta$ при 300 Дж/г;
- уменьшаются температура плавления и температура начала интенсивного разложения октогена, тэна, гексогена;
- кинетические параметры термического разложения тэна, гексогена, октогена зависят от величины поглощенной энергии, при этом ее увеличение приводит к уменьшению термостойкости исследованных ВВ.

Рассмотрена модель образования и кинетики выхода газообразных продуктов радиолита и термического разложения октогена. Показано, что полученные экспериментально зависимости выхода газов, образовавшихся в образцах октогена при радиолите и термическом разложении, могут быть непротиворечиво объяснены предложенной теоретической моделью.

Список литературы

1. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
2. Болт Р., Кэрролл Дж. Действие радиации на органические материалы. М.: Атомиздат, 1965.
3. Phung P. V. Initiation of explosives by High-energy electrons // J. Chem. Phys. 1970. Vol. 53, N 7. P. 2906.

4. Stolovy A., Aviles J. et al. Electron beam initiation of high explosives // Proc. of the 7-th Symp. (Int.) on Detonation. 1981. P. 24–29.
5. Stolovy A., Jones E. C., Aviles J. B. et al. Exothermic reactions in TATB initiated by an electron beam // J. Chem. Phys. 1983. Vol. 78, N 1. P. 229–235.
6. Пикаев А. К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. М.: Наука, 1987.
7. Шумайло В. П., Громов В. Т., Павленко А. В. и др. Особенности электронного инициирования кристаллического тэна // Сб. тез. докладов VII Харитоновских тематических научных чтений. г. Саров, 2005. С. 82–83.
8. Антропов Г. П., Архангелов Н. А., Бехтев Б. В. и др. Мощный линейный ускоритель для нейтронной спектроскопии // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физических экспериментов. 1985. Вып. 2(23). С. 3–5.
9. Герман В. Н., Завьялов Н. В., Злобин А. М. и др. Исследование воздействия импульсного электронного облучения на взрывчатый состав на основе октогена // Там же. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1992. Вып. 3. С. 19–23.
10. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. М.: Мир, 1982.
11. Гребенникова С. Э., Герман В. Н., Вахмистров С. А. и др. Зависимость кинетики термического разложения ВВ от глубины протекания процесса // Сб. докл. китайско-российского семинара «Эксплуатационные характеристики и свойства взрывчатых веществ», Китай, г. Миньян, 2010. С. 81–95.
12. Рябых С. М. Закономерности образования и накопления радиолитического азота, удерживаемого кристаллической решеткой азидов тяжелых металлов // Химическая физика. 1990. Т. 9, № 2. С. 191.
13. Рябых С. М. Закономерности образования и накопления радиолитического азота, удерживаемого кристаллической решеткой азидов тяжелых металлов // Журнал физической химии. 1991. Т. 65, № 6. С. 1615.
14. Кирсанова Т. Е., Герман В. Н., Завьялов Н. В. и др. Воздействие импульсного электронного облучения на взрывчатые вещества и полимерные связующие // Сб. докл. Второго международного симпозиуме по старению ВВ. США. Монтерей, июль, 2002. С. 58–66.

Influence of Electron Irradiation on He Crystals

A. M. Zlobin, S. A. Vakhmistrov, V. N. German, N. V. Zav'yalov, T. E. Kirsanova,
T. G. Kir'yanova, E. S. Kozlova, L. E. Kornilova, A. L. Mikhaylov,
Yu. P. Orlikov, A. P. Pogorelov, V. A. Sinitsyn, A. K. Fisenko, Yu. V. Sheikov

The intent of the work is to study the impact of electrons having energy of 50 MeV in the range of absorbed doses from 10 to 300 J/g on an external view, a structure and some physical and chemical properties of crystals of PETN, RDX (cyclonite) and HMX with crystal sizes of 250–500 μm. In the course of the investigations various experimental techniques were used: optical (light microscopy and electron microscopy), spectrometric (infrared spectrometry and mass-spectrometry), thermographic and manometric.