

цесс воспламенения и проводить его, в том числе для крупномасштабных систем ( $d \times l \approx 150 \times 800$  мм), в стабилизированных смежных режимах КГ и НСД при характерных скоростях процесса соответственно 500—700 и 1000—1500 м/с.

Изучено влияние на интенсивность процесса основных исходных параметров пористой системы. Количественно определены критерии возможного перехода волнового горения в нормальную детонацию и соответствующие зависимости предельных расстояний инициирования от удельной поверхности зерна в широком диапазоне  $S_{уд} = 0,7 \div 5,5$  м<sup>2</sup>/кг. Отработан способ стабилизации воспламенения, исключая переход к НД систем диаметром, большим некоторого предельного, состоящих из зерен с удельной поверхностью, превышающей критическую величину.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Davis T. K., Kuo K. K. // J. Spacecraft and Rockets.— 1979.— 16, N 4.— P. 203.
2. Davis T. K., Kuo K. K. // AIAA J.— 1977.— 8, N 1.— P. 854.
3. Фотеев В. А., Коротков А. И. и др. Распространение конвективного горения в зарядах насыпной плотности // ФГВ.— 1982.— 18, № 2.— С. 137.
4. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С., Коротков А. И. и др. Закономерности распространения волн конвективного горения в замкнутом объеме // Там же.— 1987.— 23, № 6.— С. 9.
5. Постнов В. Н., Соловьев В. С. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.— Черногоровка, 1977.— С. 65.
6. Болотов А. А., Ловягин Б. М., Манулов Н. А. и др. 50-канальный генератор световых импульсов // Приборы и техника эксперимента.— 1975.— № 3.— С. 198.
7. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 22/XII 1989,  
после доработки — 2/XI 1992

УДК 662.21 : 541.15

С. М. Рябых, В. П. Жуланова

#### ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФУЛЬМИНАТА РТУТИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Изучено изменение температуры вспышки и чувствительности к удару гремучей ртути при облучении  $\gamma$ -лучами  $\text{Co}^{60}$  и импульсными электронами. В интервале поглощенных доз  $(1-5) \cdot 10^5$  Гр повышается чувствительность гремучей ртути. Отмечено изменение свойств гремучей ртути в процессе хранения облученных образцов. Показано изменение ИК-спектра при облучении.

Фульминат ртути — один из наиболее известных инициирующих взрывчатых веществ (ВВ). В [1] подробно исследовано влияние различных факторов на температуру и время задержки взрыва. Показано, что время задержки вспышки гремучей ртути, предварительно прогретой при температурах, больших температуры начала термического разложения, меньше, чем у исходных образцов. Там же отмечено, что гремучая ртуть, прогретая при 75 °С в течение 94 дней, становится нечувствительной к удару и не взрывается при прогреве до 170 °С. Исходные образцы гремучей ртути взрываются уже при 235 °С через 40 мин прогрева.

Однако таких же подробных исследований изменений гремучей ртути при облучении не проводилось. В работе [3] приведены результаты облучения инициирующих ВВ горячими и быстрыми нейтронами. Гремучая ртуть под пучком нейтронов не взрывалась. В [4] показано, что в основном все ВВ стабильны к воздействию радиации и при облучении  $\gamma$ -лучами  $\text{Au}^{198}$  с энергией 0,41 МэВ изменение взрывчатых

свойств начинается при дозах выше  $10^6$  р. В [5], на основании данных [4], определено, что бризантная способность гремучей ртути уменьшается при облучении дозой 26 Мрад. Но испытания проводились через 35 дней после облучения, поэтому объяснить это изменение только облучением нельзя, так как ниже показано, что при хранении облученной гремучей ртути идут процессы медленного разложения и (вследствие этого) изменение взрывчатых свойств.

В данной работе изучалось изменение взрывчатых характеристик (чувствительности к удару и температуры вспышки) гремучей ртути непосредственно после облучения и при хранении облученных образцов.

**Эксперимент.** Для получения гремучей ртути применяли классический способ [4]. Металлическую ртуть растворяли при  $38^\circ\text{C}$  в азотной кислоте ( $d = 1,36$ ) из расчета 7 г  $\text{HNO}_3$  на 1 г Hg, затем раствор азотной кислоты ( $T = 25^\circ\text{C}$ ) вливали в спирт ( $T = 19^\circ\text{C}$ , 8 г спирта на 1 г Hg). Получали поликристаллический препарат серого цвета, степень чистоты которого 98—99%. Для анализа гремучей ртути (по содержанию фульминат-иона) применяли метод Броундсона с небольшими изменениями [4].

Образцы гремучей ртути облучались  $\gamma$ -лучами изотопа  $\text{Co}^{60}$  на установке  $\gamma$ -РМХ-20 (мощность поглощенной дозы от 2 до 5 Гй/с, температура образцов при облучении  $45^\circ\text{C}$ ) и импульсами быстрых электронов с интегральной плотностью потока энергии  $0,02$  Дж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса 15 нс. Для дозиметрии  $\gamma$ -излучения в качестве дозиметра применялся  $\text{KNO}_3$  [6]. Энергетические характеристики импульсных электронов определялись колориметрическим методом [7]. Все эксперименты с облученными образцами проводились сразу же после облучения. Температура вспышки определялась при нагревании образцов гремучей ртути (15 мг) в сплаве Вудда при постоянной температуре. Фиксировалась температура для 5-секундной задержки вспышки.

Чувствительность к удару определялась на копке К-44-М (удар шариком, давление прессования таблеток гремучей ртути  $p = 1000$  атм, масса таблетки 15 мг, масса падающего груза 190 г). Снимались кривые частоты срабатывания для гремучей ртути, облученной различными дозами. Кривая строилась по 7—8 точкам, для получения каждой точки испытывалось 25 образцов. Образцы запрессовывались в таблетки до облучения. Облученные образцы хранились в темноте при 60 и  $20^\circ\text{C}$ .

**Результаты и обсуждение.** Полученные результаты по стабильности гремучей ртути согласуются с данными [4]. До поглощенной дозы  $10^4$  Гй температура вспышки гремучей ртути не изменялась, но при дальнейшем облучении начинается резкое уменьшение температуры вспышки  $T_{\text{всп}}$  и энергии активации взрыва  $E_a$ , инициируемого теплом. Из рис. 1 видно, что наиболее сильное изменение  $T_{\text{всп}}$  при 5-секундной задержке  $E_a$  происходит в интервале доз  $(1 \div 10) \cdot 10^4$  Гй.

Аналогично происходит и увеличение чувствительности гремучей ртути к удару. На рис. 2 представлены дозные зависимости изменения чувствительности к удару гремучей ртути. Наиболее резко уменьшается минимальная высота срабатывания, причем основное изменение происходит в интервале доз  $(1 \div 10) \cdot 10^4$  Гй. При поглощенной дозе  $D \geq 5 \cdot 10^5$  Гй начинает меняться характер взрыва, что проявляется в снижении силы звука и увеличении пламени. В случае  $D \geq 8 \cdot 10^5$  Гй при испытании на удар гремучая ртуть не взрывается, образцы вспыхивают и сгорают.

Было показано, что изменение чувствительности к удару не зависит от вида излучения, а определяется величиной  $D$ . При облучении единичными электронными импульсами чувствительность к удару не изменялась до  $D \approx 10^4$  Гй, затем резко росла чувствительность (см. рис. 2).

Таким образом, обнаружены не вполне тривиальные последствия влияния облучения на гремучую ртуть: первоначально оно (до  $D \approx 10^5$  Гй) приводит к существенному повышению чувствительности

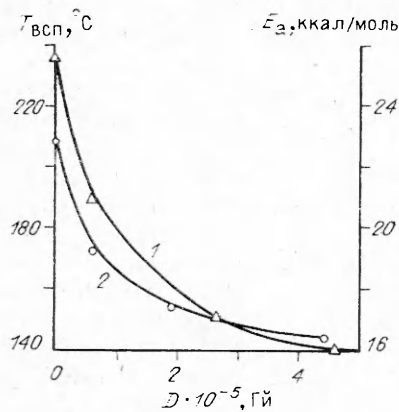


Рис. 1. Изменение температуры вспышки и энергии активации теплового взрыва фульмината ртути при облучении.  
1 —  $E_a$ ; 2 —  $T_{всп}$  при задержке 5 с.

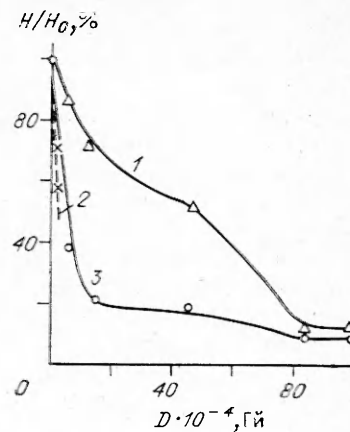


Рис. 2. Изменение чувствительности к удару гремучей ртути при статическом (—) и импульсном (---) облучении.

Отношение высот падения груза  $H$  для облученных и необлученных образцов: 1 — 100%-ное срабатывание, 2 — 50%-ное срабатывание и 3 — 100%-ный отказ.

к удару, и лишь при  $D > 5 \cdot 10^5$  Гй меняется характер взрыва и явно ухудшается инициирующая способность.

Логично сопоставить изменения взрывных характеристик гремучей ртути с процессом химического разложения этого вещества. При этом оказалось, что надо различать два вида химического разложения: собственно радиационно-химическое, протекающее в поле излучения, и низкотемпературное термическое, происходящее в образцах, подвергнутых предварительному облучению. Радиолит гремучей ртути изучен в [8], где установлено, что он идет с постоянным выходом при фиксированной температуре. При  $T = 293$  К радиационно-химический выход разложения  $G = 7$  молек/100 эВ. Температурная зависимость выхода в диапазоне  $T = 313 \div 367$  К описывается выражением  $G = Ae^{-E/RT}$ ; в интервале  $T = 77 \div 313$  К  $G = BT^{0.6}$ , где  $A$  и  $B$  — коэффициенты.

Главный вывод по итогам изучения кинетики радиолита гремучей ртути заключается в том, что общие кинетические закономерности этого процесса такие же, как и у других инициирующих ВВ [9], но характерные температурные области, в которых реализуются разные механизмы радиолита, у гремучей ртути сдвинуты в область более низких температур. В частности, так называемое радиационно-термическое разложение, при котором за счет воздействия излучения образуются начальные кластеры твердого продукта, а затем идет термолит путем возбуждения электронов из разлагаемого инициирующего ВВ в твердый продукт, может идти даже при комнатной температуре.

Так, было получено, что при хранении облученных образцов гремучей ртути идет процесс термического разложения. Скорость процесса зависит от предварительно полученной дозы и от температуры хранения. В процессе хранения изменяются взрывчатые свойства гремучей ртути. На рис. 3 видно, что при хранении облученных образцов чувствительность к удару продолжает изменяться, причем образцы, облученные дозой  $3 \cdot 10^5$  Гй, раньше достигают предела, после которого начинает меняться характер взрыва. Степень разложения образцов в области доз, где начинает меняться характер взрыва, составляет примерно 25 %.

Из сопоставления данных по чувствительности к удару и по изменению степени разложения можно провести некоторую корреляцию между величиной степени разложения и изменением чувствительности к удару и характера взрыва. При хранении предварительно облученных образцов при комнатной температуре идут те же процессы. Для образцов гремучей ртути, облученных дозой  $10^5$  Гй, чувствительность к удару

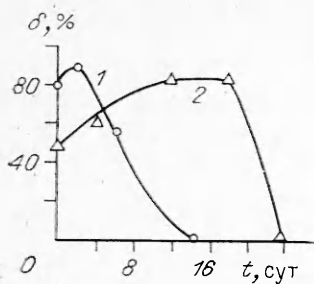


Рис. 3. Изменение чувствительности к удару при хранении облученных образцов гремучей ртути (температура хранения 60°C):  
D, Гй: 1 —  $4,7 \cdot 10^5$ , 2 —  $3 \cdot 10^5$ .

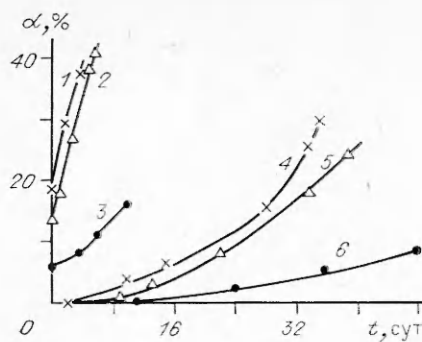


Рис. 4. Изменение степени разложения при хранении облученных образцов гремучей ртути (температура хранения 60°C):  
D, Гй: 1 —  $4,7 \cdot 10^5$ , 2 —  $3 \cdot 10^5$ , 3 —  $1 \cdot 10^5$ , 4 —  $1 \cdot 10^4$ , 5 —  $5 \cdot 10^3$ , 6 —  $1 \cdot 10^3$ .

не изменялась в течение месяца, а через 3 месяца все образцы вспыхивали пламенем без звука, но высота падения груза до 100% срабатывания образцов уменьшилась в 2 раза. Чувствительность к удару необлученной гремучей ртути, хранившейся 3 месяца при 20°C, не изменилась.

Таким образом, можно ожидать, что гремучая ртуть, облученная дозой  $D \leq 10^4$  Гй, т. е. не изменившая свои свойства сразу после облучения, в процессе хранения будет становиться более чувствительной к удару. Это подтверждается данными по радиационно-термическому разложению образцов гремучей ртути, облученных малыми дозами. Из рис. 4 видно, что для образцов, облученных дозой  $5 \cdot 10^3$  Гй, т. е. для которых сразу после облучения не изменились ни степень разложения, ни чувствительность к внешним воздействиям, уже через месяц хранения при 60°C степень разложения достигает 20%. Из сопоставления данных по изменению степени разложения и чувствительности к удару можно сказать, что после хранения образцов, облученных дозой  $5 \times 10^3$  Гй, в течение 30 суток при 60°C чувствительность к удару увеличится на 50%.

В работе [10] показано, что термическое разложение гремучей ртути идет по цепному закону, причем цепи развиваются через относительно устойчивые промежуточные продукты реакции. Таким образом, уменьшение  $T_{всп}$  можно объяснить тем, что во время предварительного прогрева при температурах начала термического разложения и во время облучения идет образование продуктов распада в очень незначительных количествах, которые не фиксируются ни химическими методами, ни по газовой выделению, но которые могут служить начальными центрами цепей при последующем термическом воздействии.

Известно, что чувствительность ВВ к механическим воздействиям тем выше, чем меньше прочность химической связи [11]. В [12] по результатам изучения инфракрасного поглощения фульмината ртути, прогретого при 88°C, показано, что уже при степени разложения ~2% начинается уменьшение интенсивности пиков, соответствующих колебаниям —CNO-группы ( $\lambda = 1225$  и  $1181 \text{ см}^{-1}$ ), а в случае степени разложения 10% (при радиоллизе степень разложения 10% достигается при  $D = (2,5 \div 3) \cdot 10^5$  Гй) эти пики полностью исчезают, но появляется новый пик при  $\lambda = 1987 \text{ см}^{-1}$ . В работе [13] появление полос в области  $\lambda = 1900 \div 2000 \text{ см}^{-1}$  ИК-спектра гремучей ртути, подвергнутой термическому разложению, объясняется образованием кластера  $\text{Me}_n\text{C}_k\text{N}_o\text{O}_p$ , который возникает в результате объединения в сложную форму продуктов разложения —CN<sub>2</sub>— и —CN—.

ИК-спектр облученных образцов фульмината ртути приведен на рис. 5. Кривые 2 (прогрев при 95°C в течение 41 ч) и 3 (облучение,

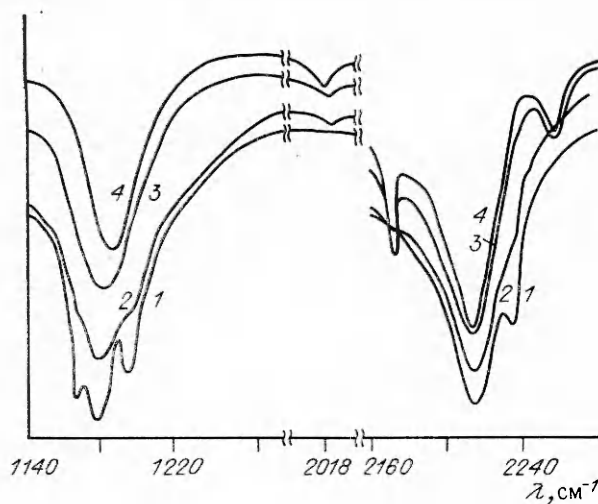


Рис. 5. Изменение ИК-спектра гремучей ртути при воздействии температуры и излучения. 1 — исходный; 2 — прогрев 41 ч при 95 °С; 3 —  $5 \cdot 10^5$  Гй; 4 —  $8 \cdot 10^5$  Гй.

$D = 5 \cdot 10^5$  Гй) соответствуют следующему состоянию вещества: степень разложения 10—15 %, чувствительность к удару образцов максимальная, область начала изменения характера взрыва. Кривая 4 соответствует состоянию вещества, где образцы гремучей ртути не взрываются, а вспыхивают и сгорают без звука. Видно, что

с увеличением  $D$  происходит значительное изменение спектра в области  $\lambda = 1160 \div 1200 \text{ см}^{-1}$ : уменьшается интенсивность пика  $1180 \text{ см}^{-1}$ , соответствующего  $\nu_2$ -колебаниям —CNO-группы, исчезает полностью пик при  $\lambda = 1197 \text{ см}^{-1}$ , соответствующий симметричным колебаниям  $\nu_1$  —CNO-группы, появляется и растет пик при  $\lambda = 2260 \text{ см}^{-1}$ .

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что начальное увеличение чувствительности фульмината ртути к удару можно объяснить изменением прочности химической связи и началом образования продуктов реакции, которые являются горячими точками, центрами образования последующего разложения. При достижении степени разложения больше 20—25 % образование значительного количества невзрывчатых продуктов разложения вызывает ухудшение взрывчатых свойств гремучей ртути.

Необходимо отметить некоторые визуальные наблюдения: при  $D = (7 \div 8) \cdot 10^5$  Гй таблетки гремучей ртути становятся более рыхлыми. В работах [14, 15] на примере азидов тяжелых металлов и тринитрорезорцината свинца показано, что при облучении газообразные продукты разложения образуют внутри кристаллов газовые полости. Давление газа в полостях и размер их увеличиваются до достижения некоторой  $D_{кр}$ , затем полости вскрываются и выходит радиолитический газ. Соответственно меняются плотность и структура кристалла. Для гремучей ртути экспериментов по определению радиолитического газа не проводилось, но факты разрыхления таблеток указывают на вскрытие полостей.

Таким образом, обобщая все изложенное, можно выделить три процесса, ответственные за изменение взрывных характеристик инициирующих ВВ при облучении:

- необратимое химическое разложение с образованием твердых и газообразных продуктов;
- радиационно-стимулированное образование метастабильной фазы, имеющей отличные от исходного ВВ взрывные характеристики;
- трансформация изначально гомогенного инициирующего ВВ в гетерогенную систему инициирующее ВВ — частицы твердого продукта — полости с газообразными продуктами, затем в рыхлую структуру в результате роста газовых полостей и наконец в пористую структуру после вскрытия полостей. При этом взрывчатые характеристики ухудшаются из-за изменения состояния поверхности и условий на контакте микрокристаллов в прессованных образцах.

Итоговое изменение взрывных характеристик ВВ — сложная функция параметров трех процессов, первый из которых — плавный необратимый, второй — обратимый, могущий привести и к повышению, и к понижению чувствительности, третий носит пороговый характер и начинается при определенной дозе.

Результаты данной работы четко подтверждают наличие двух первых процессов, обуславливающих изменение взрывных характеристик гремучей ртуть.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патри М. Горение и детонация взрывчатых веществ.— М.: Л.: Оборонгиз, 1938.
2. Wallbaum-Wittenberg R. // Z. Schiessen-und-Sprengstoff.— 1938.— 34.— P. 197.
3. Mugaour H., Ertaud A. // Comptes rendus.— 1953.— 237.— P. 1245.
4. Kaufman J. V. R. // Proc. Roy. Soc.— 1958.— A246.— P. 1245.
5. Болт Р., Кэррол Дж. Действие радиации на органические материалы.— М.: Атомиздат, 1965.
6. Кецкало В. И., Сериков Л. Ф. и др. // Сб. тез. докл. VII Всесоюз. конф. по радиационной химии.— Обнинск: ВНИИФТРИ, 1983.— С. 41—43.
7. Шпак В. Т. // Приборы и техника эксперимента.— 1980.— № 3.— С. 165.
8. Жуланова В. П., Рябых С. М. // Сб. тез. докл. II Всесоюз. конф. по теоретической и прикладной радиационной химии.— Обнинск, 1990.— С. 91—92.
9. Рябых С. М. // Химия высоких энергий.— 1988.— 22, № 5.— С. 387—397.
10. Семенов Н. Н. // Иницирующие взрывчатые вещества.— М.; Л.: ОНТИ, 1936.— № 2.— С. 47.
11. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом.— М.: Наука, 1968.
12. Singh K. // Chemic. Soc.— 1959.— P. 459.
13. Boddington T., Iqbal Z. // Trans. Faraday Soc.— 1969.— 65.— P. 509.
14. Рябых С. М. // Хим. физика.— 1990.— 9, № 2.— С. 191.
15. Рябых С. М., Мартынова Н. В., Лавренюк О. А. // Химия высоких энергий.— 1990.— 24, № 4.— С. 335.

г. Кемерово

Поступила в редакцию 9/XII 1991

УДК 533.6.011.72

В. А. Антонов, А. М. Гришин, Ю. М. Ковалев, Л. Ю. Наймушина

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА ШНУРОВОГО ЗАРЯДА В ПОЛОГЕ ЛЕСА ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОЖАРА

С помощью математического моделирования рассматривается решение двух задач: определение оптимального расположения заряда в пологе леса по высоте, при котором объем оборванных лесных горючих материалов будет наибольшим; выяснение влияния отражающего экрана на эффективность взрыва шнуrowого заряда. Из рассмотренных случаев расположения заряда (0,75, 1,5 и 2,25 м) получено, что для подрыва заряда наиболее оптимальна высота 1,5 м. При наличии отражающего экрана эффективность взрыва шнуrowого заряда увеличивается, и чем ближе экран расположен к заряду, тем она выше.

Для борьбы с низовыми лесными пожарами широко используются шнуrowые заряды [1]. В результате их подрыва на напочвенном покрове создается минерализованная полоса, ограничивающая распространение низовых лесных пожаров. В последнее время для локализации по-вальных верховых лесных пожаров используются шнуrowые заряды [2], которые взрывают над поверхностью напочвенного покрова, в кронах деревьев. Известен также способ тушения пожаров, когда параллельно заряду в пологе леса подвешивают отражающий экран, выполненный, например, из полиэтиленовой пленки [3].

При взрыве заряда возникает ударная волна (УВ), которая, распространяясь в пологе леса, обрывает листья, хвоинки, мелкие ветки деревьев и тем самым создает лесопожарную полосу, непреодолимую для верхового лесного пожара. Отражающий экран предназначен для усиления действия УВ от заряда.

На формирование поля скоростей и давлений в лесном массиве влияют энергия, выделяющаяся при взрыве, расположение заряда в пологе леса по высоте, расположение экрана, а также характеристики самого лесного массива. Ясно, что для нахождения оптимальных значений мощности и местоположения заряда и экрана необходимо либо