

сированного  $\text{FeCl}_2$  на поверхности частицы от содержания хлора в окружающей среде. Определены условия, при которых накопление конденсированного  $\text{FeCl}_2$  на поверхности частицы отсутствует.

Автор выражает благодарность В. В. Струминскому за постановку проблемы и обсуждение полученных результатов.

Поступила в редакцию 20/XII 1983,  
после доработки — 3/IV 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Фурман, Б. Г. Рабовский. Основы химии и технологии безводных хлоридов. М.: Химия, 1970.
2. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ПМТФ, 1974, 4.
3. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1975, 11, 3.
4. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1979, 15, 6.
5. В. М. Гремячкин. Химическая физика, 1983, 10.
6. I. Varin, O. Knacke. Thermochemical properties of inorganic substances. Berlin/Heidelberg, N. Y.: Springer/Verlag, 1975.

### ОБ ОЧАГОВОМ МЕХАНИЗМЕ ЗАЖИГАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВТОРИЧНЫХ ВВ МОНОХРОМАТИЧЕСКИМ СВЕТОВЫМ ИМПУЛЬСОМ

Л. Г. Страковский  
(Москва)

В настоящее время в литературе имеется значительное количество данных о воздействии лазерных импульсов на взрывчатые системы (например, [1—5]). В большинстве работ в качестве источника излучения используется лазер на неодимовом стекле (длина волны  $\lambda = 1,06$  мкм), который обеспечивает возможность изменения интенсивности и длительности светового воздействия в широких пределах.

Вторичные ВВ обладают высокой прозрачностью на длине волны 1,06 мкм [3, 6], что обуславливает специфику их воспламенения. В работах [1, 3—5] отмечено, что при пороговых параметрах зажигания (иницирования) тэна гомогенный разогрев вещества составляет примерно несколько градусов, и для выяснения механизма процесса необходимо учитывать влияние сильнопоглощающих локальных неоднородностей — очагов. В [4, 5] проведен расчет пороговой плотности энергии иницирования азид свинца поглощающим сферическим очагом на основании критических условий зажигания холодного ВВ накаленным телом конечных размеров [7]. Такой подход справедлив только при использовании лазерных импульсов пикосекундной длительности, когда, как правило,  $\tau_0 \ll t_a$  [3—5], где  $\tau_0$  — длительность импульса;  $t_a$  — время задержки воспламенения. При воздействии достаточно мощных лазерных импульсов миллисекундного диапазона время воспламенения меньше величины  $\tau_0$ . Излучение нагревает очаг в течение всего индукционного периода, и использование критического условия зажигания, основанного на представлении о конечной величине запаса тепла в очаге, является неправомерным.

Отметим, что температура поглощающего очага за время задержки зажигания может достигнуть очень высоких значений, при которых становится существенным выгорание вещества и процесс носит вырожденный характер [8]. Этот вопрос, который может представить значительный интерес при изучении механизма ударного и ударно-волнового иницирования (как и закономерности очагового зажигания в целом), в литературе не рассмотрен.

В настоящей работе на основании результатов экспериментального исследования зажигания тетрила и состава ТГ 40/60 миллисекундным

импульсом лазера на неодимовом стекле проведен качественный анализ особенностей очагового воспламенения.

В качестве источника излучения использована установка ГОС-1000. Генератор состоял из двух оптических головок, одна из которых работала в режиме квантового усилителя. Применение сферического конфокального резонатора позволило получить беспичковый режим генерации, характеризующийся наиболее равномерным распределением энергии импульса как во времени, так и в пространстве. Для дополнительного увеличения пространственной однородности использовались круглые диафрагмы, выделявшие центральную часть луча. В результате плотность потока, монотонно уменьшающаяся в радиальном направлении, на периферии облучаемой поверхности была всего на 10—12% меньше, чем в центре. Длительность импульса составляла 1—1,2 мс. Величина энергии излучения в импульсе ( $E_{\text{и}} \approx 1000$  Дж) измерялась калориметром ИКТ-1М с точностью до 10%.

Предварительно измерены оптические характеристики исследуемых ВВ: коэффициент отражения  $R_{\lambda}$  и объемная поглощательная способность  $k_{\lambda}$ . При этом для удобства измерений в качестве источника излучения на длине волны 1,06 мкм использовали частотный лазер ЛТИ-5 со средней мощностью  $\sim 1$  Вт. Коэффициент отражения измерен при помощи интегрирующей сферы шарового фотометра ФМШ-56. Для определения абсолютной величины  $R_{\lambda}$  применяли эталонный барритовый образец с известным коэффициентом отражения. В результате получено  $R_{\lambda} = (68 \pm 4)\%$  для тетрила и  $R_{\lambda} = (59 \pm 3)\%$  для литого состава ТГ 40/60.

Значения поглощательной способности тетрила —  $18,4 \text{ см}^{-1}$  и ТГ 40/60 —  $4,3 \text{ см}^{-1}$  определены по величине пропускания излучения пластинками ВВ толщиной от 2 до 5 мм. Суммарная погрешность найденных значений  $k_{\lambda}$  не превышает 7%. Следует отметить, что на длине волны 1,06 мкм в области слабого спектрального поглощения измеряемое ослабление излучения связано с потерями при многократном рассеянии и отражении от граней кристаллов вещества. Поэтому измеряемая величина  $k_{\lambda}$  сильно зависит от дисперсности и плотности ВВ. Литые пластинки из ТГ 40/60 имели плотность  $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$ , тетриловые пластинки пресовались до  $\rho = 1,62 \text{ г/см}^3$ , что соответствовало величине плотности образцов в опытах по зажиганию.

Образцы ВВ (цилиндры  $d \times h = 10 \times 18$  мм) размещали за фокальной плоскостью собирающей линзы с фокусным расстоянием 17 см. Диаметр облучаемой поверхности образца составлял при этом 8—10 мм. Величину поджигающего потока меняли калиброванными светофильтрами. Процесс фотографировался камерой СФР-2М со скоростью  $(6,25 \div 25) \cdot 10^4$  кадр/с. Зажигание фиксировали по моменту появления свечения у поверхности образца.

Типичная кинограмма процесса показана на рис. 1. Зажигание развивается в одном или нескольких очагах, хотя облучению подвергается вся торцевая поверхность.

На рис. 2, 3, 4 представлены измеренные величины времени зажигания тетрила и ТГ 40/60. Заметен аномальный характер зависимости  $t_{\text{з}}(q)$  для тетрила при  $q \geq 40 \text{ кВт/см}^2$ . Здесь же показаны соответствующие расчетные зависимости, полученные на основании кинетических параметров ВВ, найденных в опытах по зажиганию  $\text{CO}_2$ -лазером [9, 10]. Видно, что во всем исследованном диапазоне поджигающих потоков величины  $t_{\text{з}}$ , рассчитанные в предположении однородного поглощения излучения, намного превосходят экспериментальные результаты. Отметим также, что величина нагрева поверхности исследованных ВВ к моменту зажигания,



Рис. 1. СФР-грамма процесса зажигания тетрила ( $q = 120 \text{ кВт/см}^2$ ). Интервал между кадрами 32 мкс.

рассчитанная на основании измеренной величины объемной поглотительной способности, мала. Так, для тетрила при изменении поглощенного потока от 4 до 40 кВт/см<sup>2</sup> она меняется в пределах 27—59°, а для ТГ 40/60 при  $q < 40$  кВт/см<sup>2</sup> не превышает 25°. Проведенные контрольные опыты по измерению пропускания пластинок ВВ, подвергнутых лазерному облучению (которое при помощи вращающегося диска-прерывателя снималось за 10—20 мкс до момента зажигания) показали, что величина  $k_\lambda$  остается неизменной в процессе лазерного воздействия вплоть до момента зажигания.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты указывают на определяющую роль поглощающих неоднородностей при лазерном зажигании исследованных ВВ на длине волны 1,06 мкм.

Рассмотрим вопрос о возможных размерах инертных очагов и температур, реализуемых при очаговом зажигании. Из условия локальности разогрева имеем

$$r \gg \sqrt{a\tau_0}, \quad (1)$$

где  $r$  — среднее расстояние между очагами;  $a$  — коэффициент температуропроводности ВВ. Влияние очагов при зажигании может оказаться определяющим только тогда, когда их достаточно много в характерном объеме вещества, поглощающем излучение, т. е.

$$\frac{\pi d_0^2}{4r^3} \frac{1}{k_\lambda} \gg 1, \quad (2)$$

где  $d_0$  — диаметр облучаемой поверхности. Из условий (1), (2) получаем  $r \approx 10^{-2}$  см. Концентрация очагов  $n = r^{-3} \approx 10^6$  см<sup>-3</sup>, что близко к концентрации сажевых частиц в атмосферном воздухе промышленных районов [11]. Таким образом, поглощающие очаги в виде сажевых частиц могут быть привнесены во взрывчатые вещества из атмосферного воздуха при их производстве [11].

Интересно отметить, что на длине волны 10,6 мкм при  $t_3 = 10 \div 1000$  мс и  $d_0 = 2 \div 9$  мм условия (1) и (2) несовместимы, т. е. роль очагов незначительна. Действительно, в опытах по зажиганию ВВ СО<sub>2</sub>-лазером влияние очаговых неоднородностей не обнаружено [9, 10].

Максимально возможный радиус сферических очагов  $R_0$  оценим на основании соотношения

$$\frac{4}{3} \pi R_0^3 \frac{1}{r^3} \leq 0,01, \quad (3)$$

которое выражает условие, что объем включений составляет не более 1% объема вещества. Из (3) находим  $R_0 \leq 10^{-3}$  см.

Минимальные размеры поглощающих очагов, соответствующие величинам привнесенных из атмосферы при производстве ВВ сажевых частиц, составляют  $\sim 10^{-5}$  см [11]. Считая, что и очаги других возможных размеров ( $R_0 = 10^{-5} \div 10^{-3}$  см) являются сажевыми частицами, оценим величину их разогрева  $T_3$  к моменту зажигания тетрила, используя экспериментальную зависимость  $t_3(q)$ , а также теплофизические параметры

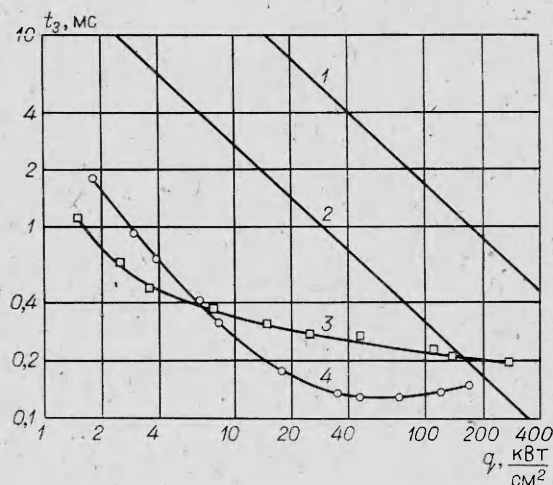


Рис. 2. Зависимости времени задержки зажигания ТГ 40/60 (1, 3) и тетрила (2, 4) от поглощенного потока излучения.  
1, 2 — расчет; 3, 4 — эксперимент.

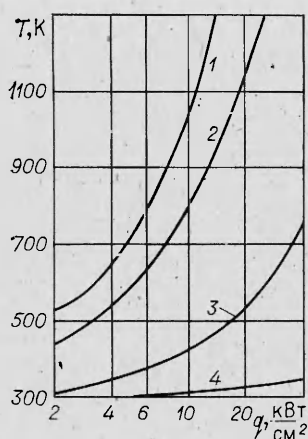


Рис. 3. Зависимости температуры поглощающих очагов от потока в момент зажигания тетрила.

$R_0$ , см: 1 —  $10^{-3}$ , 2 —  $5 \cdot 10^{-4}$ , 3 —  $10^{-4}$ , 4 —  $10^{-5}$ .

сажи  $\rho_1 = 2,2$  г/см<sup>3</sup>,  $c_1 = 0,65$  Дж/(г·К),  $a_1 = 1,22$  см<sup>2</sup>/с [12] и тетрила  $c = 1,1$  Дж/(г·К),  $a = 1,1 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с [9]. Поскольку величина  $3\rho_1 c / \rho_1 c_1 \approx 4$ , в соответствии с [13] для такой оценки можно использовать выражение

$$T_3 \approx T_0 + \frac{qR_0}{4\kappa} \left[ 1 - e^{-\frac{4at_3}{R_0^2}} \operatorname{erfc} \left( \frac{2\sqrt{at_3}}{R_0} \right) \right], \quad (4)$$

где  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности ВВ.

На рис. 3 показаны рассчитанные по формуле (4) зависимости температуры очагов разных размеров от потока в момент зажигания тетрила. Очевидно, что максимальный разогрев реализуется в наиболее крупных очагах  $R_0 \approx 10^{-3}$  см, поэтому пороговые условия зажигания определяются именно этими очагами.

При потоке  $q_{кр} \approx 12$  кВт/см<sup>2</sup> температура в очагах с размером  $R_0 \sim 10^{-3}$  см достигает критического значения для тетрила  $T_{кр} = 0,7(T_0 + Q/c) = 1123$  К, где  $Q$  — удельный тепловой эффект разложения ( $Q = 1430$  Дж/г [14]). При  $T_3 \geq T_{кр}$  существенную роль начинает играть выгорание вещества [8]. Поэтому зажигание должно иметь вырожденный характер: химическая реакция протекает без существенного самоускорения, фактически происходит вынужденное сжигание ВВ вблизи поверхности очага. Для вырожденных режимов характерно увеличение времени зажигания по сравнению с величинами, соответствующими экстраполяции зависимости  $t_3(q)$ , полученной в условиях отсутствия влияния выгорания. Как раз такая закономерность и наблюдается в эксперименте при  $q > 10$  кВт/см<sup>2</sup> (см. рис. 2).

На кинограммах процесса при таких потоках можно отметить, что размеры светящихся очагов, в которых реализуется зажигание, увеличиваются весьма медленно (см., например, рис. 1) за времена, сравнимые с задержкой воспламенения. Стадия самоускорения, приводящая к практически мгновенному формированию пламени в нормальных режимах зажигания, в данном случае фактически отсутствует.

Таким образом, в работе показано, что зажигание тетрила и состава ТГ 40/60 световым потоком на длине волны 1,06 мкм имеет ярко выраженный очаговый характер. Процесс определяется нагревом поглощающих включений типа сажевых частиц с размерами  $R_0 \sim 10^{-3}$  см. При  $q \geq 10$  кВт/см<sup>2</sup> разогрев таких включений к моменту зажигания достигает критической величины, при которой становится существенным выгорание вещества, и зажигание носит вырожденный характер. Это обуславливает аномальную зависимость времени зажигания от потока.

В заключение автор выражает благодарность П. И. Улякову и Е. И. Фролову за оказанное при выполнении работы содействие.

Поступила в редакцию 11/VII 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Бриш, И. А. Галеев, Б. И. Зайцев и др. ФГВ, 1969, 5, 4, 475.
2. G. Dauge, J. P. Giraudou, V. Ficat. 15-th Symp. (Intern.) on Comb. Pittsburgh, 1974.
3. Ю. Ф. Карабанов, Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. — В кн.: Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977.
4. Е. И. Александров, А. Г. Вознюк. ФГВ, 1978, 14, 4, 86.
5. Е. И. Александров, А. Г. Вознюк. — В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. совещания по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом. Л., 1978.

6. И. А. Галеев, Б. Н. Зайцев.— В кн.: Первый Всесоюз. симпозиум по горению и взрыву. М.: Наука, 1968.
7. У. И. Гольдшлегер, К. В. Прибыткова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1973, 9, 1, 119.
8. А. G. Merzhanov, A. E. Averson. Comb. Flame, 1971, 19, 1, 89.
9. Л. Г. Страковский, Е. И. Фролов. ФГВ, 1980, 16, 5, 140.
10. Л. Г. Страковский, П. И. Уляков, Е. И. Фролов. ФГВ, 1980, 16, 6, 59.
11. А. В. Бутенин, Б. Я. Коган. Квантовая электроника, 1971, 5, 143.
12. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплопередаче. Л.— М.: Госэнергоиздат, 1959.
13. А. А. Орлов, П. И. Уляков. ПМТФ, 1976, 1, 127.
14. Ф. И. Дубовицкий, Ю. И. Рубцов, Г. Б. Манелис. Изв. АН СССР. От. хим. наук, 1960, 10, 1763.

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ  
НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВ ТНТ  
И ГЕКСОГЕНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЛН СЖАТИЯ  
АМПЛИТУДОЙ 0,15—1,0 ГПа**

*С. Г. Андреев, М. М. Бойко, В. В. Лазарев,  
В. С. Соловьев, А. И. Чернов*

(Москва)

В последнее время в литературе появляется материал о влиянии начальной температуры заряда взрывчатого вещества на инициирование детонации ударными волнами (см., например [1]). Наблюдаемое в экспериментах увеличение чувствительности зарядов ВВ при повышении температуры обычно связывают с ростом скорости химической реакции в веществе. Однако, согласно современным представлениям, инициирование детонации — это многостадийный процесс, включающий образование очагов разогрева, их зажигание, распространение горения на окружающий объем и формирование детонационного комплекса [2]. Поэтому влияние температуры на конечный исход не позволяет определить ее роль на каждом из этапов, что затрудняет получение полной картины возбуждения и развития взрывчатого превращения в широком диапазоне внешних воздействий. В связи с этим представляет интерес выявление роли температурных воздействий при исследовании начального этапа процесса.

С этой целью проводили эксперименты по воздействию на заряды ТНТ и гексогена волн сжатия малой амплитуды, вызывающих их разложение. Заряды нагружали на установке, описанной в [3], по схеме «уходящей» детонационной волны импульсом давления, временной профиль которого близок к прямоугольному. В качестве нагружающего заряда использовали низкоплотные ВВ, варьируя плотностью которых создавали нагрузки в диапазоне 0,15—1,0 ГПа. В двух сериях опытов время действия нагрузки задавалось 50 и 100 мкс. Вследствие неидеальности возбуждения заданного уровня давления не превышало 10 мкс.

Исследовали литые заряды ТНТ со столбчатой структурой начальной плотностью 1,57 г/см<sup>3</sup> и заряды прессованного гексогена (без флегматизирующих и растворяющих добавок) начальной плотностью 1,70 г/см<sup>3</sup>. Образцы исследуемых ВВ диаметром 20 и высотой 5—7 мм помещали в капсулы наружным диаметром 35 мм, отпрессованные из хлористого калия, способного выдерживать высокие температуры без разложения и имеющего ударную адиабату, близкую к адиабатам исследуемых ВВ. Использование образцов выбранной толщины позволяло получить достаточную воспроизводимость эффекта начального разложения образца и исключить развитие последующих стадий, связанных с интенсивными газодинамическими процессами. Требуемая начальная температура образцов достигалась предварительным термостатированием в течение трех часов капсул с образцами и контролировалась непосредственно перед