

## О МЕХАНИЗМЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ ИЗЛУЧЕНИЕМ ОКГ

А. А. Бриш, И. А. Галеев,  
Б. Н. Зайцев, Е. А. Сбитнев, Л. В. Татаринцев

(Москва)

Ранее [1] сообщалось о возбуждении детонации взрывчатых веществ под действием излучения оптического квантового генератора на неодимовом стекле. Сейчас осуществлен световой подрыв ряда других вторичных ВВ — гексогена, октогена и т. д., а также накоплен дополнительный экспериментальный материал по взаимодействию лазерного излучения с исследованными ранее азидом свинца и тэном. Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований и рассматривается наиболее вероятный механизм светового подрыва ВВ.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на лабораторной установке, описанной в работе [1]. Длительность импульса ОКГ в режиме модуляции добротности равна  $5 \cdot 10^{-8}$  сек (на уровне половинной мощности), а в режиме свободной генерации — около  $10^{-3}$  сек. В последнем случае излучение состоит из серии пучков длительностью порядка  $10^{-6}$  сек.

Применение неодимового стекла и рубина позволило провести исследования на двух длинах волн ( $10600 \text{ \AA}$  и  $6943 \text{ \AA}$ ). Повышение интенсивности лазерного излучения проводилось фокусировкой его сферическими линзами, уменьшение — диафрагмой и нейтральными фильтрами.

Градуировка измерительной схемы и определение энергетических параметров лазерного излучения осуществлялись с помощью калориметра с термопарой. Точность измерения энергии не хуже  $10^{-2}$  дж.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены результаты измерения задержки вспышки ВВ от плотности лазерного излучения. С целью расширения диапазона исследований эксперименты проведены на азиде свинца. На том же рисунке для наглядности приведена расчетная кривая. Видно, что в широком интервале изменения задержки приблизительно от  $10^{-8}$  до  $10^{-4}$  сек необходимая для подрыва энергия практически постоянна, выше  $10^{-4}$  сек она возрастает.

Для моноимпульса постоянной длительности время работы навески ВВ с ростом плотности падающего излучения уменьшается до некоторого предельного значения. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость времени работы навески тэна.

При больших диаметрах луча ( $d$ ) критическая плотность излучения ( $q_{кр}$ ) постоянна, при малых — возрастает (рис. 3). Характер зависимости для азиды свинца и тэна аналогичен, отличие в численном значении необходимой для подрыва плотности излучения и в точке изменения характера этой зависимости ( $d_0$ ). Для азиды свинца  $d_0 \approx 0,1$  мм, для тэна дисперсностью  $5500 \text{ см}^2/\text{г}$  — около  $0,6$  мм и уменьшается при увеличении дисперсности.

Указанная зависимость критической плотности излучения от диаметра луча практически сохраняется при переходе от длины волны 10600 Å к 6943 Å, что согласуется с результатами измерения коэффициента отражения ВВ на этих длинах волн [2].

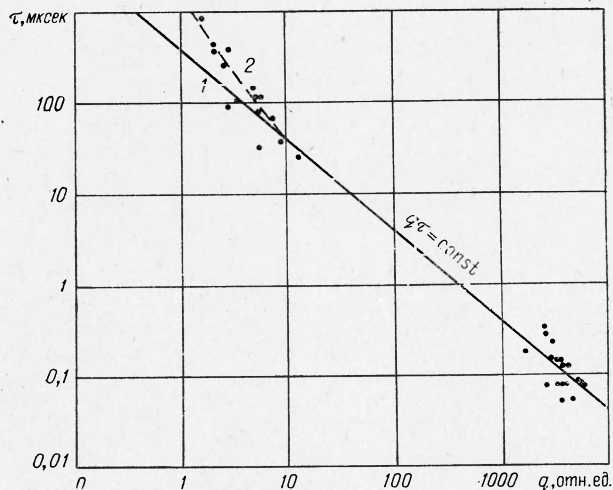


Рис. 1. Зависимость задержки вспышки от плотности лазерного излучения.

1 — расчетная кривая ( $q$  — среднее значение плотности падающего излучения до момента вспышки ВВ,  $\tau$  — время между моментами появления импульсов генератора и вспышки ВВ); 2 — экспериментальные значения.

С ростом давления запрессовки ВВ ( $P$ ) необходимая для подрыва плотность лазерного излучения возрастает (рис. 4).

Исследуемые ВВ отражают большую часть падающего на них лазерного излучения — около 80% [2]. Добавление металлических или диэлектрических примесей с меньшим коэффициентом отражения может привести к снижению потерь энергии на отражение и соответствующему уменьшению критической плотности излучения.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По современным представлениям [4] возбуждение взрыва под действием внешнего начального импульса сводится независимо от вида приложенной энергии к образованию «горячих» точек, в которых происходит интенсивное термическое разложение молекул ВВ. В общем виде, учитывая имеющиеся в литературе сведения по воздействию лазерного излучения на «пассивные» материалы [5] и света обычных источников на взрывчатые вещества [6], можно представить себе несколько возможных механизмов образования «горячих» точек под действием лазерного излучения.

**Световой удар.** Падающее на поверхность ВВ излучение оказывает световое давление  $p$ , величина которого может быть рассчитана по известной формуле:  $p = \frac{q}{c} (1 + R)$ , где  $q$  — плотность падающего излучения,  $R$  — коэффициент отражения света поверхностью ВВ.

При критических значениях плотности лазерного излучения это давление имеет порядок  $10^{-2}$  кГ/см<sup>2</sup> для азида свинца и около

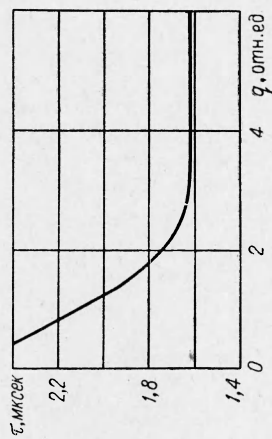


Рис. 2. Зависимость времени работы на вески тэна от плотности лазерного излучения.

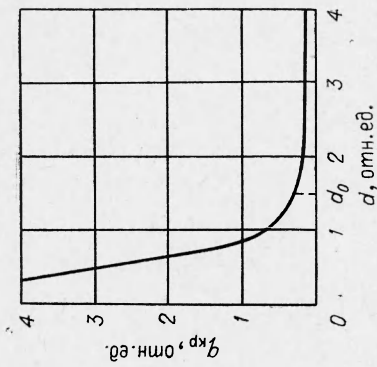


Рис. 3. Зависимость критической плотности излучения от диаметра инициирующего луча.

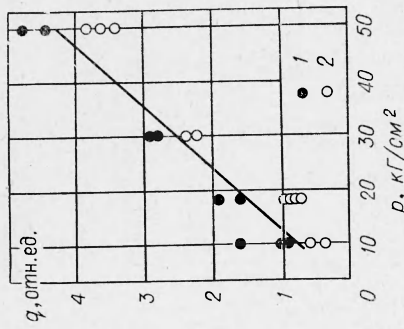


Рис. 4. Зависимость необходимой для подрыва энергии лазерного излучения от давления запрессовки ВВ.  
1 — подрыв; 2 — отказ.

$1,5 \text{ кГ/см}^2$  — для тэна. Известно, что для ударного подрыва этих же ВВ даже с задержками взрыва в десятки и сотни микросекунд требуются давления на несколько порядков выше. К тому же в соответствии с таким механизмом критическая плотность излучения с ростом коэффициента отражения ВВ должна падать, а экспериментальная зависимость — обратная.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты нельзя объяснить влиянием светового давления лазерного луча.

**Инициирование ВВ электрическим пробоем.** Одно из интересных явлений, обнаруженных при изучении взаимодействия лазерного излучения с веществами, является электрический пробой газов [7, 8].

Известно, что рассматриваемые ВВ являются сравнительно хорошими диэлектриками. Для их пробоя необходимо приложить значительное электрическое поле, в частности электрическая прочность пресованного азид свинца имеет порядок  $10^5 \text{ в/см}$ , тэна — почти на порядок выше.

Средняя напряженность электрического поля лазерного луча, рассчитанная для критической плотности излучения, при подрыве азид свинца близка к  $0,7 \cdot 10^5 \text{ в/см}$ , для тэна — около  $8 \cdot 10^5 \text{ в/см}$ . Максимальная напряженность поля может быть в 3—5 раз выше вследствие локальной неоднородности интенсивности лазерного луча по сечению, соответствующей различным колебательным модам ОКГ. И хотя размеры областей с большими локальными полями чрезвычайно малы, они могут служить местом возникновения пробоя.

В случае пробоя за время лазерного импульса в тепло может превратиться значительная световая энергия, соизмеримая с вводимой так, что электрический пробой ВВ под действием лазерного излучения с критической плотностью может привести к образованию «горячих» точек.

Возможность инициирования ВВ электрическим пробоем удовлетворительно согласуется также с исследованиями влияния давления прессования, длины волны и интенсивности лазерного излучения. Вместе с тем характер влияния коэффициента отражения ВВ и длительности импульса, а также отсутствие различия в инициировании ВВ с примесью диэлектрических и металлических порошков противоречит этой гипотезе.

Таким образом, возможность электрического пробоя ВВ под действием лазерного излучения не исключена, особенно в условиях нагревания вещества в очаге вследствие поглощения света, однако электрическая искра не является определяющей в процессе возникновения взрыва.

**Фотохимическое возбуждение взрыва.** Величина кванта излучения неодимового ОКГ равна  $1,17 \text{ эв}$ , рубинового —  $1,78 \text{ эв}$ , что много ниже значений, необходимых для прямого фотоэффекта в исследованных ВВ. Но высокая напряженность электрического поля лазерного луча делает необходимым анализ возможности многоквантового фотоэффекта, при котором отрыв электрона или разрыв связи происходит в результате одновременного поглощения нескольких квантов.

Точный расчет многоквантового фотоэффекта в ВВ затруднен. Но оценки с точностью до порядка показывают, что вероятность его мала и за время действия лазерного импульса этим путем может разложиться ничтожная часть ВВ. Качественный ход экспериментальных кривых также не согласуется с резко выраженной зависимостью многоквантового фотоэффекта от частоты электромагнитного излучения и напряженности электрического поля [9]. Таким образом, световой под-

рыв ВВ в рассматриваемых условиях не носит фотохимического характера.

**Тепловой механизм.** Как показывают эксперименты, значительная часть падающего на ВВ излучения отражается и теряется, а оставшаяся часть поглощается в некотором слое взрывчатого вещества с экспоненциальным распределением интенсивности по глубине. Следствием поглощения световой энергии и превращения ее в тепловую может быть образование «горячих» точек в ВВ.

Была проведена оценка температуры тэна в очаге численным решением на ЭЦВМ уравнения теплопроводности с учетом потерь энергии на отражение, лучеиспускание и конвекцию. Для простоты не учитывалось влияние тепловой энергии химического разложения ВВ и кинетической энергии газодинамических процессов. Расчет показал:

а) «растекание» тепла вследствие распространения из очага тепловой волны за время лазерного импульса ничтожно мало (характеристический параметр  $\sqrt{at}$  имеет порядок  $10^{-4}$  мм, а размер начального очага поглощения световой энергии порядка  $10^{-2}$  мм). Оно заметно влияет на баланс энергии только при больших длительностях лазерного импульса (порядка  $10^{-4}$  сек и выше), вызывая увеличение энергии подрыва (см. рис. 1);

б) при критических плотностях моноимпульсного излучения максимальная температура очага может быть  $1500^\circ\text{K}$ , что по порядку величины совпадает с критической температурой тэна в данных условиях [4];

в) при таких температурах потери энергии на лучеиспускание с нагретой поверхности ВВ на несколько порядков ниже вводимой энергии. Таким образом, энергия лазерного излучения, за исключением потерь на отражение, расходуется в основном на нагревание ВВ в объеме начального энерговода, ограниченном диаметром луча и глубиной проникновения электромагнитного излучения во взрывчатое вещество.

Введение в очаг инициирования за короткое время сравнительно большой энергии неизбежно приводит к росту давления. По нашим оценкам, оно имеет порядок  $10^4$  кг/см<sup>2</sup> и соизмеримо с критическим давлением тех же ВВ при ударном инициировании. Косвенным подтверждением высокого давления в очаге является постоянство коэффициента отражения исследованных ВВ практически до взрыва в условиях возрастания плотности падающего излучения.

Таким образом, при инициировании взрывчатых веществ лазерным излучением температура и давление в очаге соизмеримы по порядку величин со значением тех же параметров при других известных способах подрыва. Конечно, фактическое давление и температура в очаге, а также выходящая из него ударная волна будут несколько иными вследствие влияния газодинамических процессов и химического разложения ВВ. Приведенные оценки характеризуют лишь порядок этих параметров.

Тепловая гипотеза позволяет объяснить весь комплекс результатов экспериментального исследования лазерного подрыва ВВ. С ее позиций становятся понятными уменьшение критической плотности излучения при снижении коэффициента отражения ВВ и отсутствие различия в ней для двух исследованных длин волн, находящихся в области слабого поглощения взрывчатых веществ, а также влияние давления запрессовки ВВ, изменение времени работы навески с ростом плотности и т. д.

Последняя зависимость позволяет предположить, что скорость начальной ударной волны при возбуждении взрыва с минимальной энергией близка к критической скорости детонации заряда в рассматриваемом

