

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

© 2006 Н.А. Сазонникова<sup>1</sup>, В.В. Пойлов<sup>2</sup>, Г.А. Галимова<sup>2</sup>, М.Р. Хайрутдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup> -Научно-исследовательский институт проблем конверсии и высоких технологий (г. Самара)

При использовании относительно высоких плотностей мощности лазерного излучения возможно осуществить быстрый нагрев малой дозы взрывчатого вещества до критической температуры. Использование лазеров для инициирования взрывных процессов является перспективным потому, что они позволяют точно контролировать и измерять величину энергии, преобразованной в энергию взрыва и скорость, с которой эта энергия выделяется. В этом случае имеется возможность контролировать, какая часть взрывчатого вещества нагрета лазерным излучением. Это осуществляется непосредственно путем изменения размеров пятна, создаваемого лазерным излучением на поверхности, так как контроль глубины проникновения лазерного излучения во взрывчатое вещество ограничен, и данные измерения трудно осуществить.

Исследование процессов взаимодействия лазерного излучения с высокоэнергетическими веществами является важным инструментом для создания надежных устройств одноразового срабатывания в системах двигателей летательных аппаратов. Применение волоконной оптики исключает попадание другого направленного излучения, сравнимого по мощности с командным. Малая апертура применяемых оптических волокон не позволяет проходить случайным световым сигналам. Важным преимуществом такой системы является возможность проконтролировать и измерить время срабатывания пиропатрона. Необходимо отметить технологичность подобного устройства, так как не требуется строгого выравнивания торцев оптических волокон и плоскости заряда. Между окном и концом жгута оптических волокон не существует плотного контакта.

Реакция окисления горючих веществ при определенных условиях может самопроизвольно ускоряться и переходить в реакцию горения. Такой процесс возникновения горения называется самовоспламенением. Самовоспламенение может быть тепловое и цепное. При тепловом самовоспламенении причиной ускорения реакции окисления и возникновения горения является превышение скорости выделения тепла над скоростью теплоотвода, а при цепном - превышение вероятности разветвлений цепей над вероятностью их обрывов. Обычно горение возникает в результате теплового самовос-

пламенения, хотя само химическое превращение при этом может протекать в виде цепных реакций.

Лазерное инициирование веществ может быть осуществлено двумя различными путями: чисто термическим и ударным. При экстремально высоких плотностях энергии возможна абляция поверхности вещества или образующаяся тонкая пленка, которая вызывает относительно быстрое ударное инициирование вещества. При плотностях мощности меньших, чем  $1 \text{ ГВт/см}^2$  механизм инициирования чисто термический. В этом случае вещество нагревается до тех пор, пока не будет достигнута критическая температура, после чего реакция протекает автономно. Одним из преимуществ лазерного теплового излучения то, что оно позволяет использовать низкие плотности мощности и, соответственно, лазеры с низкой мощностью излучения. В частности, возможно использовать лазерные диоды, которые имеют относительно низкую стоимость и малые размеры. При плотностях мощности ниже пороговой величины лазерное излучение вызывает нагрев вещества до стабильной температуры, меньше критической. В этом случае при любых значениях энергии (или времени воздействия) не происходит инициирование. Эта область определена преимущественно как область теплопроводности. При плотностях мощности выше пороговой критиче-

ская температура достигается до установления стабильной температуры, и воспламенение инициируется, однако, в этом случае значительная часть энергии отводится за пределы области инициирования.

Критическая температура определяется как температура, при которой энергетический баланс между химической энергией реализован, и теплопроводность способствует теплоотводу в пределах вещества. При высоких скоростях нагрева и относительно малых нагреваемых площадях (объемах), рассматриваемых как высокоэнергетические, преимущественно с высокой тепловой энергией, инициирование с помощью лазерного диода возможно при нагреве локальных участков вещества до экстремально высокой температуры до того, как существенное количество тепла будет отведено из области непосредственного воздействия лазерного излучения.

Реакция окисления горючих веществ при определенных условиях может самопроизвольно ускоряться и переходить в реакцию горения. Такой процесс возникновения горения называется самовоспламенением. Самовоспламенение может быть тепловое и цепное. При тепловом самовоспламенении причиной ускорения реакции окисления и возникновения горения является превышение скорости выделения тепла над скоростью теплоотвода, а при цепном - превышение вероятности разветвлений цепей над вероятностью их обрывов. Обычно горение возникает в результате теплового самовоспламенения, хотя само химическое превращение при этом может протекать в виде цепных реакций.

Энергия инициирования, и, соответственно, задержка инициирования непосредственно зависят от скорости, при которой лазерная энергия (мощность) поглощается, и от площади, на которой мощность поглощается, что выражается как плотность мощности и количественно выражается в ваттах на квадратный сантиметр ( $Вт/см^2$ ). Зависимость энергии инициирования от плотности мощности лазерного излучения для чисто термического воздействия представлена на рис. 1. При плотностях мощности ниже пороговой величины (область I) лазерное излучение вызывает нагрев вещества до стабильной темпе-

ратуры, меньше критической. В этом случае при любых значениях энергии (или времени воздействия) не происходит инициирование. Эта область определена преимущественно как область теплопроводности. При плотностях мощности выше пороговой (область II) критическая температура достигается до установления стабильной температуры, и воспламенение инициируется, однако, в этом случае значительная часть энергии отводится за пределы области инициирования.

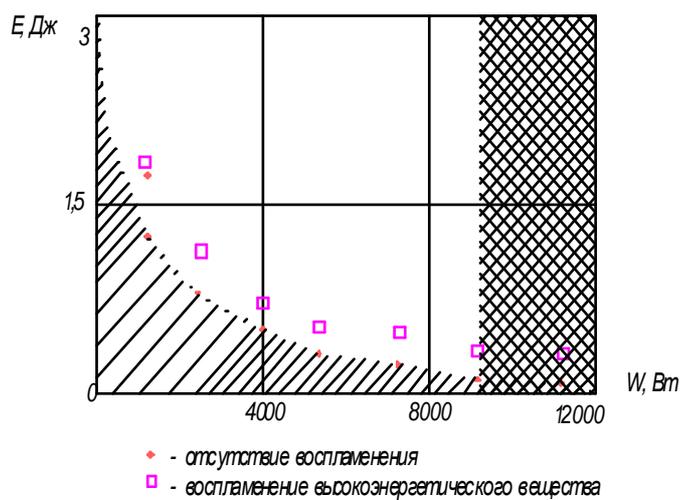


Рис.1. Зависимость энергии горения от плотности мощности для типовых устройств в инициировании на основе лазерных диодов

Так как плотность мощности в этой области возрастает в соответствии с «эффектом теплопроводности», вещество нагревается до критической температуры более быстро, поэтому для воспламенения требуется меньшее количество энергии. В конечном счете, при относительно высоких плотностях мощности вещество нагрето до критической температуры до того как значительное количество энергии может быть отведено из области воспламенения в окружающую среду. В этой области, названной областью «отсутствия проводимости», энергия, необходимая для достижения критической температуры постоянна, так как нет отвода тепловой энергии из области воспламенения.

Предположение постоянства энергии воспламенения в области III законно только в том случае, если критическая температура вещества зависит от скорости нагрева и размеров пятна. Как определено выше, критическая температура часто описывается как температура, при которой энергетический баланс между химической энергией реализован, и теплопроводность способствует теплоотводу в пределах вещества.

При высоких скоростях нагрева и относительно малых нагреваемых площадях (объемах), рассматриваемых как высокоэнергетические, преимущественно с высокой тепловой энергией, инициирование с помощью лазерного диода возможно при нагреве локальных участков вещества до экстремально высокой температуры до того, как существенное количество тепла будет отведено из области непосредственного воздействия лазерного излучения. Можно ожидать, что критическая температура должна зависеть от скорости нагрева и размеров пятна при таких режимах, предполагая, что значительное количество вещества нагрето до критической температуры. Настоящее исследование имеет цель исследовать эту гипотезу с помощью нескольких серий экспериментов при различных скоростях нагрева, т.е. плотностях мощности лазерного излучения и различных масштабах, т.е. различных размерах лазерного пятна.

Разработан стенд для экспериментальных исследований протекания взрывных процессов, который позволяет с временным разрешением синхронно изучать движение передней (облучаемой) поверхности образца, взрывного разложения и детонационного фронта, свечение разлетающихся продуктов взрыва. Стенд аналогично разработкам [1] позволяет проводить эксперименты в атмосфере воздуха и в защитной среде с помощью специально разработанных для этих целей экспериментальных ячеек. С использованием телеканалов совместно с ПЭВМ предусмотрена возможность разделения в пространстве и времени регистрации процессов, протекающих в зоне облучения лазерным пучком и протекающих за пределами этой зоны. Имеется возможность вариации плотности мощности лазерного воздействия изменением положения исследуемого образца от допоро-

говых до многократно превышающих критические величины взрывного разложения сред различных классов.

При инициировании детонации выявлено три группы факторов, определяющих интенсивность ввода энергии и быстрого нагрева вещества [2]. Первая группа – это параметры лазерного импульса: длина волны, длительность импульса, распределение плотности энергии по сечению пучка. Вторая группа – параметры ВВ: его формула, плотность монокристалла и исследуемого заряда, дисперсность, оптические характеристики, химические константы. Третья группа – параметры, определяющие геометрию воздействия на ВВ и его окружение: диаметр пучка и его форма, прозрачная оболочка или ее отсутствие.

Оптические характеристики определяют при инициировании на начальной стадии лазерного воздействия распределение в ВВ плотности поглощенной энергии, а вместе с этим, температуру и давление. К оптическим характеристикам следует отнести коэффициенты отражения и поглощения, а также показатели ослабления и рассеяния, определяющие полностью мутную или дисперсную среду. Заметим, что существенное повышение энергетических параметров лазерного потока для инициирования ВВ определяется использованием в их составе нитроцеллюлозного лака (НЦ 222) с использованием растворителя 646. С увеличением длины волны излучения энергетические параметры лазерного потока также возрастают, что связано со спектральными характеристиками исследуемых веществ.

Для упрощения методики исследования процессов инициирования ВВ разработана конструкция детонатора с осевым подводом потока излучения. Здесь используется система контактного воспламенения элементов веществ различных типов, размещенных по возрастанию критических величин взрывного разложения. Для гарантированного срабатывания детонатора он имеет канал отвода воспламененной конденсированной среды. Осевой подвод лазерного излучения к детонатору позволяет сохранить от разрушения оптическую

систему при многократном проведении исследований.

Схема оптической системы для исследования динамики взрывных процессов и определения времени задержки инициирования ВВ приведена в предыдущей статье настоящего сборника.

Детонация смеси бертолетовой соли достигается с увеличением плотности (мощности излучения). Здесь следует сделать вывод, что взрывное горение возможно лишь при попадании лазерного потока с высокой плотностью излучения  $q_0 > 20 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> на поверхность высокоэнергетического вещества.

На рис. 2 изображен общий вид области

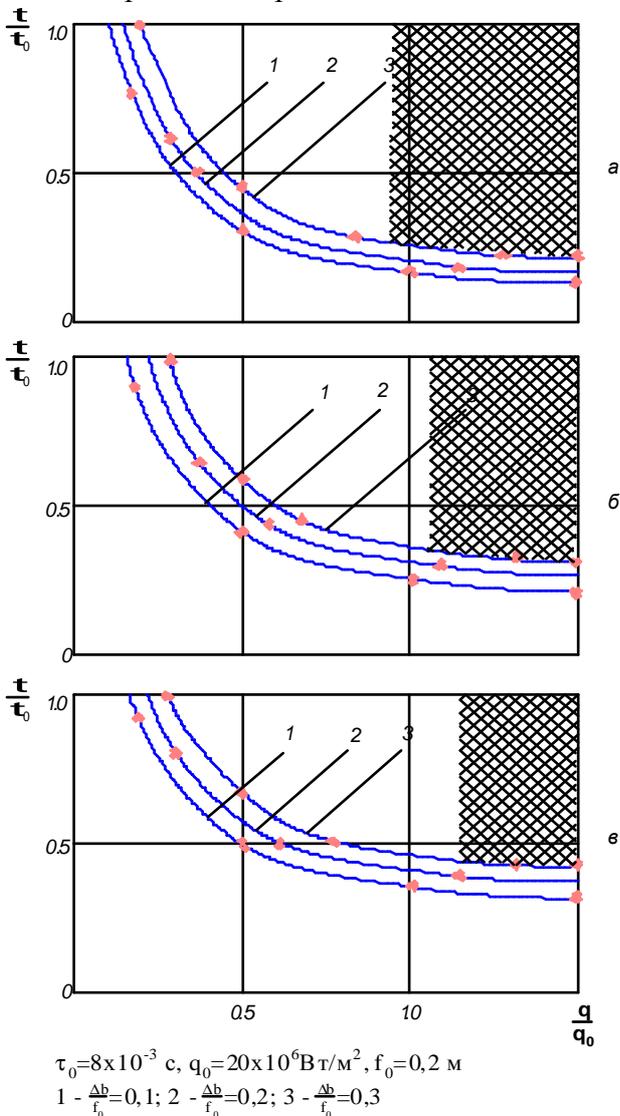


Рис. 2. Общий вид области пороговых величин энергии лазерного излучения инициирования воспламенения смеси бертолетовой соли и диоксида свинца связующего на основе нитроцеллюлозного лака (а -  $n=5\%$ , б -  $n=10\%$ , в -  $n=15\%$ ) при удалении образца от фокуса  $f_0$  на величину  $\Delta b$

пороговых величин энергии лазерного излучения инициирования воспламенения ВДТ ОСТ В84 1385-76 после предварительного прессования с удельным усилием при удалении образца от фокуса  $f_0$  на величину  $\Delta b$ . При изменении относительной величины  $\frac{q}{q_0}$  в интервале от 0,6 до 1,2 параметр  $\frac{\tau}{\tau_0}$  изменяется от 0,5 до 0,45 ( $P=0,6 \times 10$  Па,  $\frac{\Delta b}{f_0}=0,1$ ).

В случае изменения  $P$  в интервале от  $0,4 \times 10$  Па до  $0,8 \times 10$  Па параметр  $\frac{\tau}{\tau_0}$  изменяется в интервале от 0,45 до 0,6 ( $\frac{q}{q_0}=1,0$ ;

$\frac{\Delta b}{f_0}=0,3$ ).

Увеличение фокусного расстояния  $\frac{\Delta b}{f_0}$  в интервале от 0,1 до 0,3 приводит к возрастанию значения  $\frac{\tau}{\tau_0}$  от 0,45 до 0,6 ( $\frac{q}{q_0}=1,0$ ;  $P=0,8 \times 10$  Па).

### Список литературы

1. Волкова А.А., Куропатенко В.Ф., Першина А.В., Сапожников А.Т., Таржанов В.И. Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. — Черногловка. — 1978. — С. 46-50.
2. Александров Е.И. // Горение конденсированных систем. ОИХФ АН СССР. — Черногловка. — 1986. — С. 55-59.
3. Подолина Е.А. Теория горения и взрыва. Учебн. Пособие — Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2004. — 88 с.
4. Hafenrichte E.S.r, Pahl R.J. The Effects of Scale and Heating Rate on the Microscale Ignition Criteria of Laser Diode Ignited Explosives. 36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar June 28 - July 1, 2005 Karlsruhe Federal Republic of Germany.
5. Таржанов В.И. Физика горения и взрыва/ Предвзрывные явления при быстрым инициировании бризантных взрывчатых веществ. Снежинск, 2003, с.3-10.

## **THE INVESTIGATION OF ENERGY CONSUMPTION AT THE INTERACTION OF LASER EMISSION WITH HIGH ENERGY MATERIALS**

© 2006 N.A. Sazonnikova<sup>1</sup>, V. V. Poylov<sup>2</sup>, G.A. Galimova<sup>2</sup>, M.R. Hayrutdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> –Samara state aerospace university

<sup>2</sup> –The Scientific-research institute of conversion and high technology problems, Samara

By using relatively high laser power densities, it is possible to quickly heat small portion of the explosive to the critical temperature. The application of lasers to initiate explosives is advantageous because it allows to closely control and measure how much energy is delivered to the explosive and the rate at which that energy is delivered. The researcher has some degree of control over how much of the explosive material is heated by the laser. This is accomplished primarily by varying the spot size produced by the laser, as control over the penetration depth of the laser light into the explosive is much more limited and difficult to measure.