

6. A.V.Fedorov, A.L.Mikhailov, L.L.Antonyuk, D.V.Nazarov, S.A.Finyushin, // Combustion Explosion and Shock Waves (Fizika Goreniya i Vzryva), 2011, V. 47, No.5.
7. A.V.Fedorov, // J. Chem. Phys., 2005, V.24, No.10, pp.13-21.
8. A.V.Fedorov, A.L.Mikhailov, L.L.Antonyuk, D.V.Nazarov, S.A.Finyushin, Determination of Parameters of Chemical Reaction Zone and Chapman-Jouguet State in Homogeneous HE and Heterogeneous HE. // Book of Abstracts for XI International Conference "Zababakhin Scientific Talks", June 02-06, 2012, Snezhinsk, p.94.
9. S.A.Kolesnikov, A.V.Utkin, V.M.Mochalova, A.V.Anantin, // Combustion Explosion and Shock Waves (Fizika Goreniya i Vzryva). 2007. V.43, No. 6.
10. E.A.Kozlov, V.I.Tarzhanov, I.V.Telichko, A.V.Vorobiov, K.V.Levak, V.A.Matkin, A.V.Pavlenko, S.N.Malyugina, A.V.Dulov, Reaction Zone Structure for the Detonating Fine-Grained TATB // Proceedings of SWCM-2012, Kiev, pp. 58-60, 2012.
11. E.A.Kozlov, V.I.Tarzhanov, I.V.Telichko, A.V.Vorobiov, K.V.Levak, V.A.Matkin, D.P.Kuchko, M.A.Ralnikov, D.S.Boyarnikov, A.V.Pavlenko, S.N.Malyugina, A.V.Dulov, TATB Reaction Zone Structure under Normal and Overdriven Detonation // International conference "XV Khariton's Topical Scientific Readings", March 18 – 22, 2013, Sarov.
12. R.E.Duff, E.F.Houston, // J. Chem. Phys., 1965, 23, 1268.
13. A.N.Dremin, P.F.Pokhil, // J. Phys.Chem., 1961, 34 (11), 2561.
14. Ya. B.Zeldovich, A.S.Kompaneets. Detonation theory.–M.: 1955, 268 p.
15. E.A.Kozlov, V.I.Tarzhanov, I.V.Telichko, D.G.Pankratov, D.P.Kuchko, M.A.Ralnikov, On Combining the Optical Lever and Laser Heterodyne Techniques to Study Dynamic Properties of Structural Materials // Book of Abstracts for XII International Conference "Zababakhin Scientific Talks", June 02-06, 2014, Snezhinsk, p.229.
16. O.T.Strand, D.R.Goosman, C.Martinez, T.L.Whitworth, W.W.Kuhlow, // Rev. Sci. Instr., 2006, 77, 083108.
17. Yu.A.Aminov, Yu.R.Eskov, M.M.Gorshkov, V.T.Zaikin, G.V.Kovalenko, Yu.R.Nikitenko, G.N.Rykovarov, // Combustion Explosion and Shock Waves (Fizika Goreniya i Vzryva). 2002. V.38, No. pp 121-124.
18. Experimental Data on Shock-Wave Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Materials / Edited by R.F.Trunin. Sarov: RFNC-VNIIEF, 2006, 531 p.

## **ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ГЕКСОГЕНА ПО ПОВЕРХНОСТИ ПЛОЩАДЬЮ $\sim 1000$ мм<sup>2</sup>**

*Н.П. Хохлов, Н.А. Понькин, И.А. Лукьяненко, А.В. Руднев, О.М. Луковкин, Ю.В. Шейков, С.М. Батьянов*

РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия

### **Введение**

В ИФВ проводятся систематические исследования воздействия лазерного излучения на светочувствительные взрывчатые составы (СВС). В результате этих исследований предложены рецептуры СВС на основе ряда высокодисперсных бризантных ВВ с добавлением нанодисперсного алюминия, а также разработаны малогабаритные светочувствительные элементы диаметром 5 мм с использованием СВС, в которых пороговая плотность энергии инициирования составляет  $\sim 0,5$  Дж/см<sup>2</sup> [1]– [3].

Целью настоящей работы является исследование детонационных процессов, возбуждаемых лазерным излучением в СВС на основе гексогена в плоских слоях толщиной порядка нескольких миллиметров на поверхности площадью до  $\sim 1000 \text{ мм}^2$ .

Исследование включает в себя проведение экспериментов по воздействию на плоские цилиндрические мишени диаметром до 40 мм, снаряжённые слоем низкоплотного ( $\rho=0,9\pm 0,1 \text{ г/см}^3$ ) заряда из СВС толщиной 5 мм и дополнительным зарядом толщиной 2 мм из пластифицированного тэна. В экспериментах регистрировали параметры лазерного излучения (ЛИ) (энергию и форму импульса, распределение плотности энергии в облучаемом пятне на мишени), и параметры взрывчатого превращения в мишени (время срабатывания заряда и разновременность выхода ДВ на его тыльную поверхность). В качестве источника ЛИ использовали лазерную установку на основе активного элемента из неодимового стекла, работающую в режиме модулирования добротности.

## 1 Экспериментальная установка и постановка экспериментов

### 1.1 Лазерный исследовательский комплекс и экспериментальные мишени

Эксперименты проводили в ИФВ на лазерном исследовательском комплексе (ЛИК), предназначенном для проведения исследований по воздействию мощного лазерного излучения на мишени, содержащие светочувствительные взрывчатые вещества. В состав ЛИК входят лазерная установка (ЛУ) «Импульс 100», малогабаритная взрывозащитная камера (МВЗК) с входной и выходной оптическими оснастками для ввода излучения и для регистрации световых процессов.

Лазерная установка «Импульс 100» с активным элементом из стекла, активированного ионами неодима, обеспечивала генерацию импульса когерентного оптического излучения в режиме модулированной добротности с длиной волны 1064 нм, длительностью  $\sim 120 \text{ нс}$ , энергией в импульсе до 200 Дж.

В качестве локализирующего устройства для защиты элементов ЛИК от взрывного воздействия и продуктов взрыва использовали оснащенную оптическими оснастками МВЗК с номинальной нагрузкой ВВ 100 г тэ.

Подбор уровня энергии емкостного накопителя для оптической накачки излучателя осуществляли в предварительных опытах с использованием инертных мишеней.

Для выявления качественной картины распределения энергии по плоскости пятна несфокусированный лазерный луч, отраженный от светоделительного клина, направляли на фотобумагу. Степень потемнения фотобумаги качественно отражала распределение плотности энергии ЛИ по сечению пучка. В этих же опытах определяли средний диаметр и, соответственно, площадь засвеченного излучением пятна на фотобумаге. Используя полученные изображения на фотобумаге, оценивали плотность падающей на мишень энергии, и проводили корректировку положения центра пятна излучения относительно центра мишени и луча юстировочного газового лазера.

Мишени состояли из корпуса, активного заряда из СВС, пассивного заряда из штатного пластифицированного ВВ и отсечки. В качестве СВС использовали разработанную ранее смесь высокодисперсного гексогена с нанодисперсным алюминием, имеющим размеры частиц 50–100 нм [3]. Схема активной мишени приведена на рисунке 1.

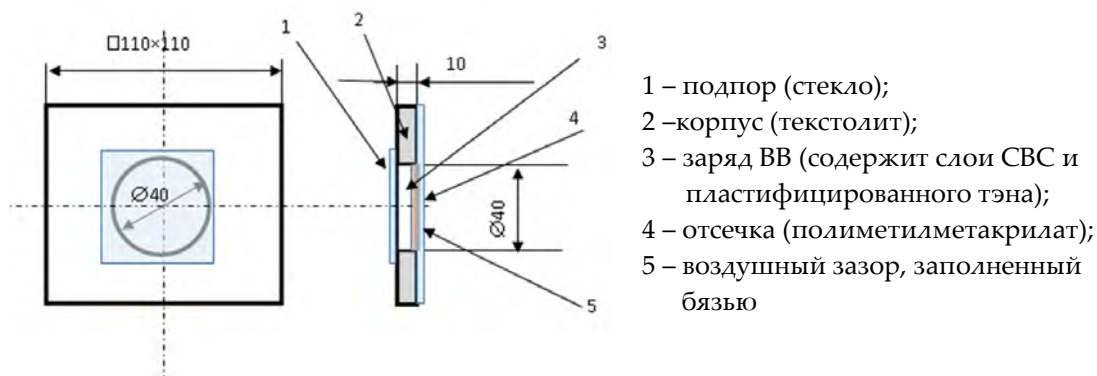
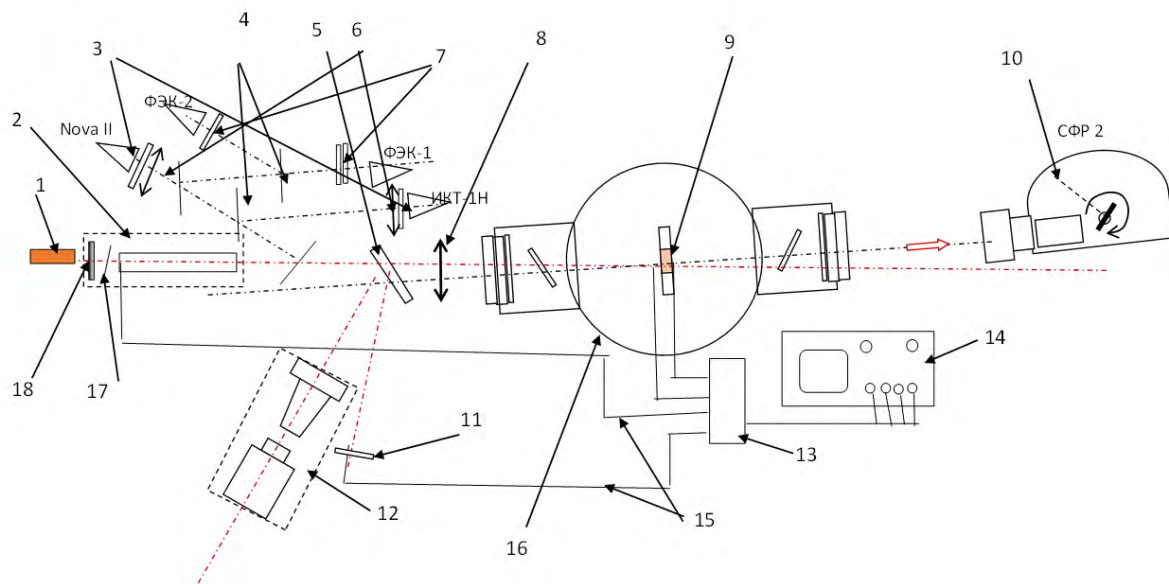


Рисунок 1. Схема активной мишени

## 1.2 Постановка экспериментов и методы регистрации параметров ЛИ и взрывчатого превращения

На рисунке 2 приведена схема лазерного исследовательского комплекса с оптическими элементами и приборами контроля, расположенными на оси отраженного лазерного луча. Для измерения энергии ЛИ использовали калориметры ИКТ-1Н со стрелочной индикацией показаний и Nova-II с цифровой индикацией и функцией запоминания. Показания стрелочного прибора снимали с использованием видеокамеры TRENDnet.



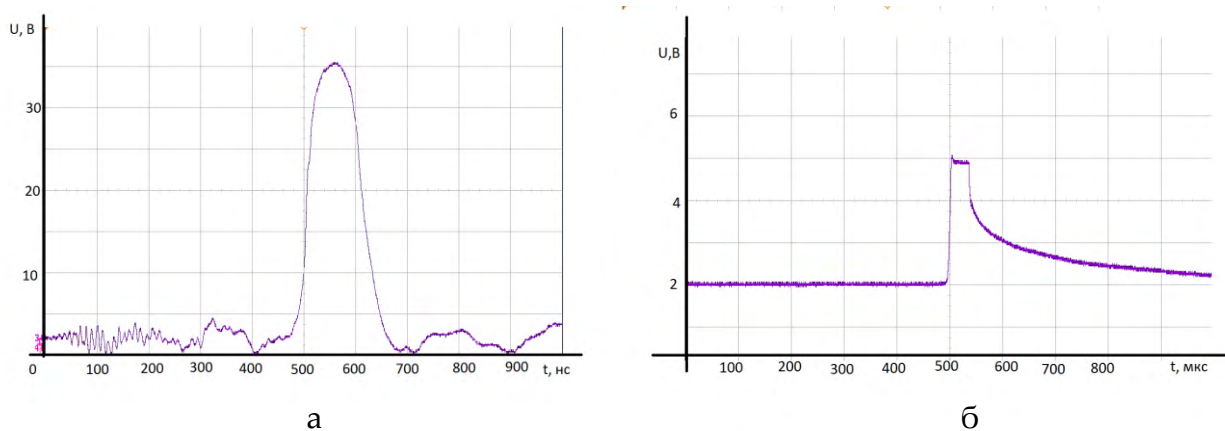
- |                                          |                               |
|------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. юстировочный лазер газовый ЛГ-72;     | 10. СФР 2;                    |
| 2. генератор когерентного излучения      | 11. контрольная фотобумага;   |
| 3. головки калориметрических измерителей | 12. камера ЭОР;               |
| 4. светоделительные пластины;            | 13. ФОЭП;                     |
| 5. светоделительный клин;                | 14. Осциллограф;              |
| 6. фокусирующие линзы;                   | 15. Оптоволоконные шнуры;     |
| 7. светофильтры;                         | 16. МВЗК                      |
| 8. линза;                                | 17. Плёнка взрывзатвора;      |
| 9. мишень;                               | 18. Зеркало резонатора R=0,99 |

Рисунок 2. Схема лазерного исследовательского комплекса

Форму импульса излучения регистрировали двумя фотоэлементами ФЭК-09. Один из них регистрировал профиль моноимпульса, другой использовали для контроля качества работы ЛИ в режиме модулированной добротности. Форму и амплитуду разрядного тока, протекающего в разрядном промежутке, регистрировали с использованием пояса Роговского. В качестве регистраторов применялись осциллографы.

Регистрацию процесса выхода ДВ на тыльную сторону заряда проводили с использованием скоростного фоторегистратора (СФР), работающего в режиме растровой съёмки.

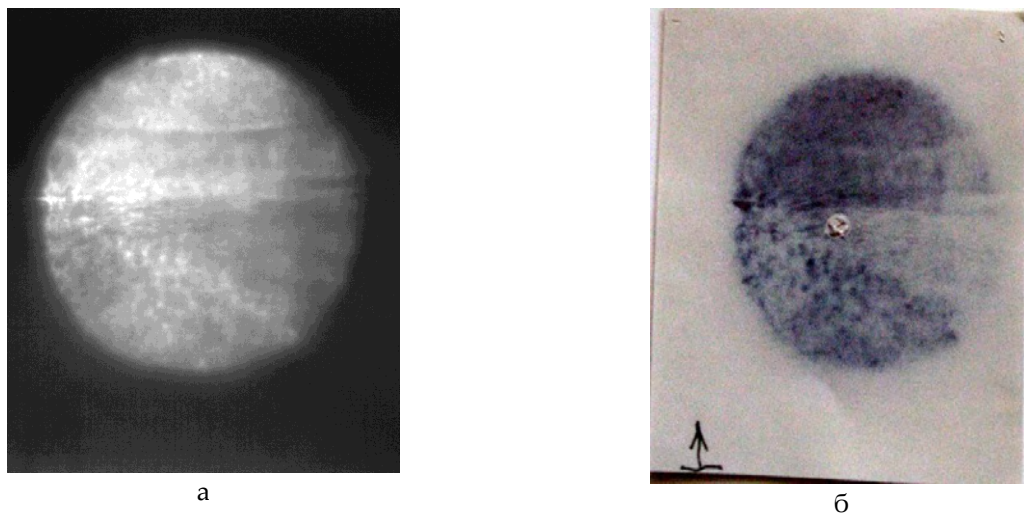
Для регистрации интервалов времени в процессах, при которых возникают световые вспышки, такие как лазерный импульс, свечение в газоразрядной полости излучателя, свечение ДВ при выходе с тыльной стороны заряда и др., применяли оптоволоконный метод регистрации с использованием измерительного комплекса, состоящего из волоконно-оптических датчиков, фотопреобразователя, осциллографа и источника бесперебойного питания. Оптические датчики представляли собой свободные концы оптоволоконного шнура, заделанные в специальный разъём или зачищенный конец оптоволокна. Типичные осциллограммы записи лазерного моноимпульса и отклика оптического датчика на него приведены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Типичные осциллограммы лазерного моноимпульса (а)  
и отклика оптического датчика на него (б)

Для количественных оценок пространственного распределения энергии излучения в ЛИ регистрировали изображение пятна излучения с использованием скоростной камеры с последующей его компьютерной обработкой. Используемая скоростная камера исполнена на матричном полупроводниковом детекторе с размерами чувствительной области  $15,6 \times 15,3$  мм<sup>2</sup> (разрешение – 2048x2048 пикселей), оснащена электронным затвором и светосильным длиннофокусным объективом, обеспечивает кадровую регистрацию с экспозицией от 500 нс, и динамическим диапазоном 76,5 дБ. Открытие и закрытие электронного затвора камеры задается параметрами управляющего сигнала, который контролируется с помощью осциллографа.

На рисунке 4 представлены полученные на отражениях от разных сторон одного и того же оптического клина изображения распределения энергии импульса лазерного излучения по сечению пучка, зарегистрированные на ПЗС-матрице скоростной камеры и на фотобумаге, устанавливаемой на оси второго отражения от оптического клина.



**Рисунок 4.** Отображение распределения энергии импульса лазерного излучения по сечению пучка, зарегистрированное на скоростную камеру (а) и на фотобумагу (б) в одном и том же эксперименте.

Анализ распределения плотности энергии по сечению лазерного пучка в экспериментах позволил получить информацию о её влиянии на формирование и одновременность выхода ДВ на тыльную сторону заряда.

## 2 Результаты экспериментов с плоскими активными мишенями

Как отмечалось выше, все изготовленные для опытов активные мишени имели диаметр заряда 40 мм (рисунок 1). Для последовательного повышения плотности энергии ЛИ, падающего на заряд, изменяли такие параметры ЛИ, как выходная энергия излучения и диаметр сфокусированного пятна.

Регистрацию выхода ДВ на тыльную поверхность заряда проводили скоростной камерой СФР-2 в режиме растровой съемки с шагом раstra 0,5 и 0,25 мм. Скорость развертки изображения по фокальной дуге соответствовала 3 км/с.

Пробные опыты на плоских зарядах при воздействии ЛИ со средней плотностью энергии ( $Q_p \sim 3$  Дж/см<sup>2</sup>) показали, что воздействие ЛИ с такой плотностью энергии вызывает устойчивое взрывчатое превращение на всей площади мишени, но при этом выход ДВ на тыльную поверхность заряда происходит в отдельных областях (одной или двух) и только затем ДВ распространяется по всей поверхности. Такой режим взрывчатого превращения весьма далёк от условий формирования плоской ДВ, что не позволяет определить значения плотности энергии ЛИ, требуемые для достижения необходимых показателей одновременности ДВ.

На основании результатов пробных опытов были сформулированы требования к параметрам ЛИ и характеристикам заряда в дальнейших экспериментах. В частности, для плоских активных мишеней средняя плотность энергии  $Q_p$  должна превышать 5 Дж/см<sup>2</sup>, толщина слоя СВС должна быть не менее 5 мм.

В таблицах 1 и 2 представлены характерные результаты, полученные в экспериментах по воздействию ЛИ на плоские слои СВС на основе гексогена в исследуемых мишенях при последовательном увеличении плотности энергии в пятне излучения.

Для упрощения интерпретации результатов эксперименты разделены на две серии:

1 – эксперименты, в которых диаметр пятна лазерного излучения, падающего на заряд, больше диаметра заряда (таблица 1);

2 – эксперименты, в которых диаметр пятна ЛИ меньше диаметра заряда (таблица 2).

В таблицах на предварительных снимках пунктиром и сплошной линией обозначены, соответственно, контуры заряда и пятна ЛИ.

В первой серии опытов пятно ЛИ перекрывало площадь заряда, а значения средней плотности энергии по всему полю облучения ( $Q_{\text{п}}$ ) варьировались от 2,8 Дж/см<sup>2</sup> до 4,7 Дж/см<sup>2</sup>. На зарегистрированных растрограммах наблюдалась тенденция к уменьшению общей разновременности выхода ДВ на тыльную сторону заряда при увеличении плотности энергии ЛИ. В частности, увеличивалось отношение площади на заряде, где относительное время выхода ДВ не превышало 50 нс ( $S_{\Delta t \leq 50}$ ), к общей площади заряда  $S_{\text{зар}}$ .

Поскольку на имеющейся установке не было возможности влиять на распределение плотности энергии ЛИ в пучке, во второй серии опытов увеличили плотность энергии, падающей на заряд. При этом контролировали распределение энергии в пятне излучения для соотнесения значений разновременности с плотностью энергии ЛИ в локальных областях поверхности заряда.

Во второй серии опытов повышение плотности энергии, падающей на заряд, достигалось за счёт фокусировки пучка ЛИ до размеров диаметра его пятна на мишени, не превышающих диаметра заряда. Регистрацию распределения плотности энергии в пятне ЛИ вели с использованием скоростной камеры описанной выше.

Значения средней плотности падающей энергии на мишень  $Q_{\text{п}}$  варьировали в диапазоне от 6,3 Дж/см<sup>2</sup> до 8,4 Дж/см<sup>2</sup>. Результаты обработки растрограмм, представляли в виде значений относительного времени (разновременности) выхода ДВ ( $\Delta t$ ) на тыльную сторону заряда.

По полученным значениям относительного времени выхода ДВ  $\Delta t$  строили цветные карты разновременности выхода ДВ по всей площади заряда (таблицы 1 и 2).

Распределение плотности энергии (Дж/см<sup>2</sup>) в пятне ЛИ (таблица 2, столбец 3) получали по результатам обработки изображения, регистрируемого скоростной камерой. Значения плотности энергии в выбранной области ЛИ определяли по формуле:

$$Q_{\text{обл.}} = \frac{I_{\text{обл.}} \cdot E_{\text{полн.}}}{I_{\text{полн.}} \cdot S_{\text{обл.}}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{обл.}}$ ,  $I_{\text{обл.}}$  – плотность энергии ЛИ, сумма яркости пикселей в выбранной области, соответственно;  $E_{\text{полн.}}$ ,  $I_{\text{полн.}}$  – энергия и сумма яркости пикселей во всём пятне ЛИ;  $S_{\text{обл.}}$  – площадь выбранной области (на мишени). Для наглядности составили цветовую карту распределения плотности энергии, вычислив плотность энергии в областях, соответствующих каждому пикселю полученного изображения, используя видоизменённую формулу (1):

$$Q_{\text{pix.}} = \frac{I_{\text{pix.}} \cdot E_{\text{полн.}}}{I_{\text{полн.}} \cdot S_{\text{pix.}}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{pix.}}$  – плотность энергии в области мишени, соответствующей одному пикселю ПЗС-матрицы;  $I_{\text{pix.}}$  – яркость выбранного пикселя;  $S_{\text{pix.}}$  – площадь на мишени, соответствующая одному пикселю ПЗС-матрицы.

Полученную цветовую карту распределения плотности энергии совмещали в соответствующем масштабе с цветовой картой разновременности выхода ДВ на тыльную сторону заряда. Затем находили значения средней плотности энергии в локальных областях диаметром 2 мм, соответствующих положениям точек расчёта разновременности выхода ДВ (в дальнейшем эти области также будем называть «точки»). Полученные результаты опытов представляли в виде массива данных, в которых приводили значения относительного времени выхода ДВ ( $\Delta t$ ) и локальной плотности энергии ЛИ ( $Q$ ) в одних и тех же точках заряда.

Для оценки эффективности работы плоского заряда при достигнутых уровнях  $Q_{\text{п}}$  с относительным временем выхода ДВ на его тыльную поверхность 50 нс использовали такой параметр, как отношение площади, на которой разновременность выхода ДВ составила  $\leq 50$  нс, к площади облучённой области заряда. Учитывая принципиальную дискретность получаемой информации об относительном времени выхода ДВ, оценивали интересующий нас параметр как число точек с разновременностью выхода ДВ  $\leq 50$  нс, отнесённое к числу точек, попадающих в облучённую зону. Полученные значения в процентах для каждого эксперимента приведены в последнем столбце таблицы 1 и предпоследнем столбце таблицы 2.



Таблица 1. Результаты опытов первой серии

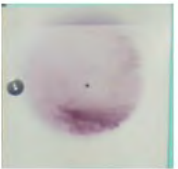
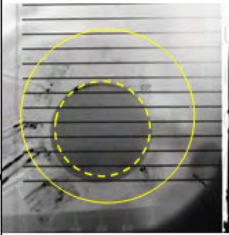
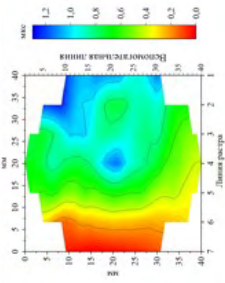
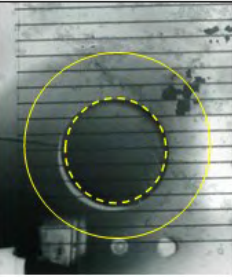
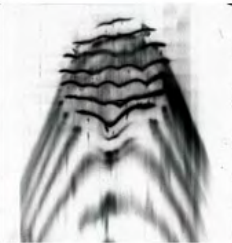
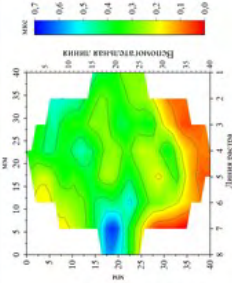
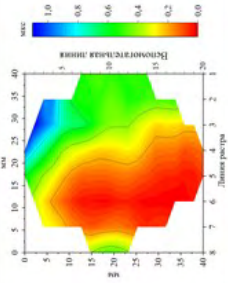
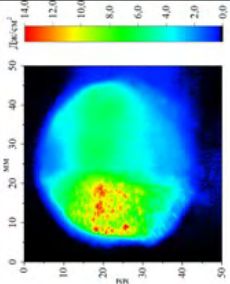
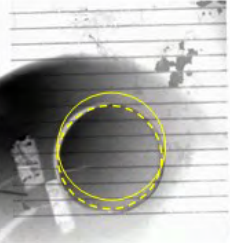
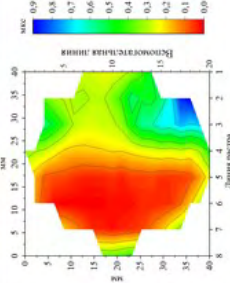
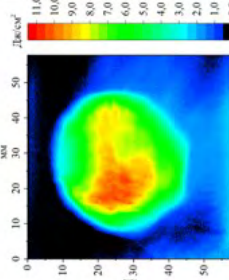
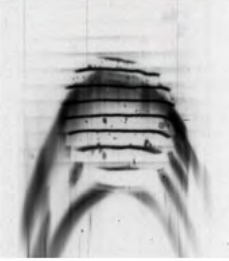
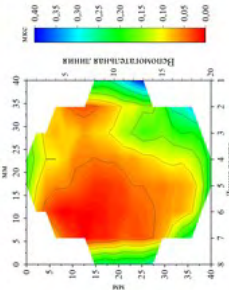
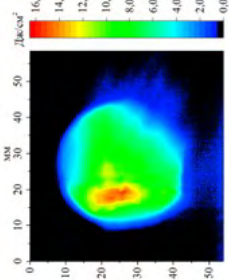
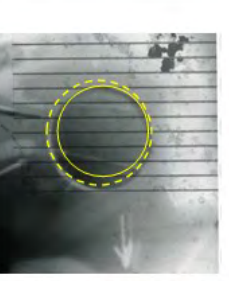
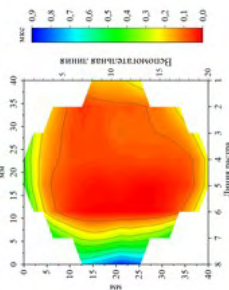
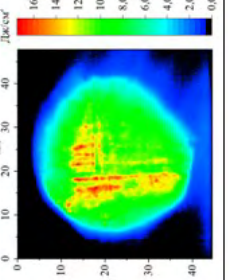
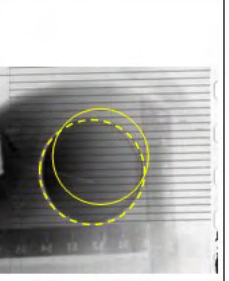
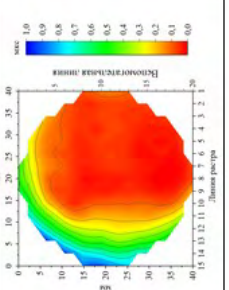
| № опыта | Параметры ЛМ                                                                                                                                                                 | Распределение плотности энергии по пятну ЛМ                                                          | Предварительный снимок тыльной стороны мишени                                        | Растрограмма выхода ДВ                                                             | Карта относительного времени выхода ДВ                                             | Доля площади заряда с $\Delta t \leq 50$ нс, % |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| № 66    | $d_{\text{п}} = 73$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 170$ Дж<br>$E_{\text{пл}} = 117$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 41,9$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 2,8$ Дж/см <sup>2</sup>      | <br>Нет измерений |   |   |   | 6                                              |
| № 73    | $d_{\text{п}} = 73$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 196$ Дж<br>$E_{\text{пл}} = 135$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 41,9$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 3,2$ Дж/см <sup>2</sup>      | Нет измерений                                                                                        |    |   |   | 3                                              |
| № 76    | $d_{\text{п}} = 44$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 103$ Дж<br>$E_{\text{пл}} = 65,2$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 15,2$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 4,3$ Дж/см <sup>2</sup>     | Нет измерений                                                                                        |   |   |   | 13                                             |
| № 79    | $d_{\text{п}} = 41,5$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 108,5$ Дж<br>$E_{\text{пл}} = 63,2$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 13,5$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 4,7$ Дж/см <sup>2</sup> |                  |  |  |  | 24                                             |

Таблица 2. Результаты опытов второй серии (площадь пятна ЛИ меньше площади заряда)

| №опыта | Параметры ЛИ                                                                                                                                                              | Распределение плотности энергии по пятну ЛИ                                          | Предварительный снимок тыльной стороны мишени                                        | Растрограмма выхода ДВ                                                             | Карта относительного времени выхода ДВ                                             | Доля площади заряда с $\Delta t < 50$ нс, % | $Q_{\text{отт.}} \pm$ СКО, Дж/см <sup>2</sup> |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| №80    | $d_{\text{п}} = 39,2$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 131$ Дж<br>$E_{\text{п}} = 76,3$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 12,1$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 6,3$ Дж/см <sup>2</sup> |   |   |   |   | 37                                          | $8,1 \pm 1,6$                                 |
| №82    | $d_{\text{п}} = 34,6$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 112$ Дж<br>$E_{\text{п}} = 65$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 9,4$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 6,9$ Дж/см <sup>2</sup>    |   |   |   |   | 30                                          | $10,1 \pm 1,9$                                |
| №87    | $d_{\text{п}} = 36,6$ мм,<br>$E_{\text{вых}} = 152$ Дж<br>$E_{\text{п}} = 88,5$ Дж,<br>$S_{\text{п}} = 10,5$ см <sup>2</sup> ,<br>$Q_{\text{п}} = 8,4$ Дж/см <sup>2</sup> |  |  |  |  | 42                                          | $11,2 \pm 2,1$                                |

В таблицах 1 и 2:

$E_{\text{вых}}$  – энергия моноимпульса ЛИ на выходе излучателя;

$E_{\text{п}}$  – энергия в пятне ЛИ, падающая на мишень (заряд);

$Q_{\text{п}} = E_{\text{п}}/S_{\text{п}}$  – плотность падающей энергии на мишень (заряд);

$\Delta t$  – относительное время выхода ДВ;

$d_{\text{п}}$  – диаметр пятна излучения на мишени (заряде);

$S_{\text{п}}$  – площадь пятна излучения на мишени (заряде)

$Q_{\text{отт.}}$  – оптимальная плотность энергии ЛИ на поверхности заряда, соответствующая разновременности  $\Delta t \leq 50$  нс

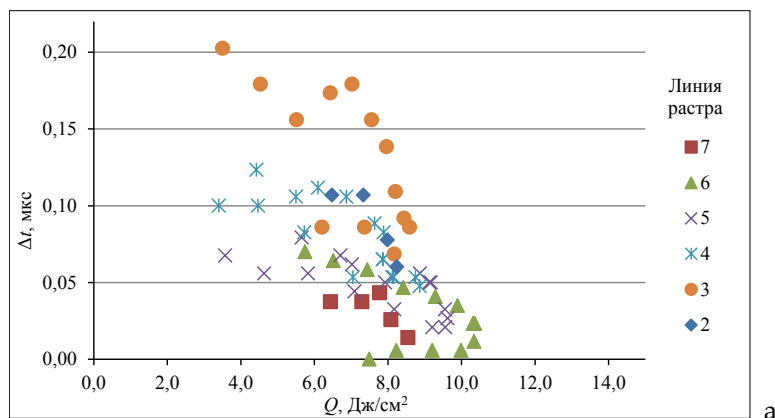


Полученную цветовую карту распределения плотности энергии совмещали в соответствующем масштабе с цветовой картой разновременности выхода ДВ на тыльную сторону заряда. Затем находили значения средней плотности энергии в локальных областях диаметром 2 мм, соответствующих положениям точек расчёта разновременности выхода ДВ (в дальнейшем эти области также будем называть «точки»). Полученные результаты опытов представляли в виде массива данных, в которых приводили значения относительного времени выхода ДВ ( $\Delta t$ ) и локальной плотности энергии ЛИ ( $Q$ ) в одних и тех же точках заряда.

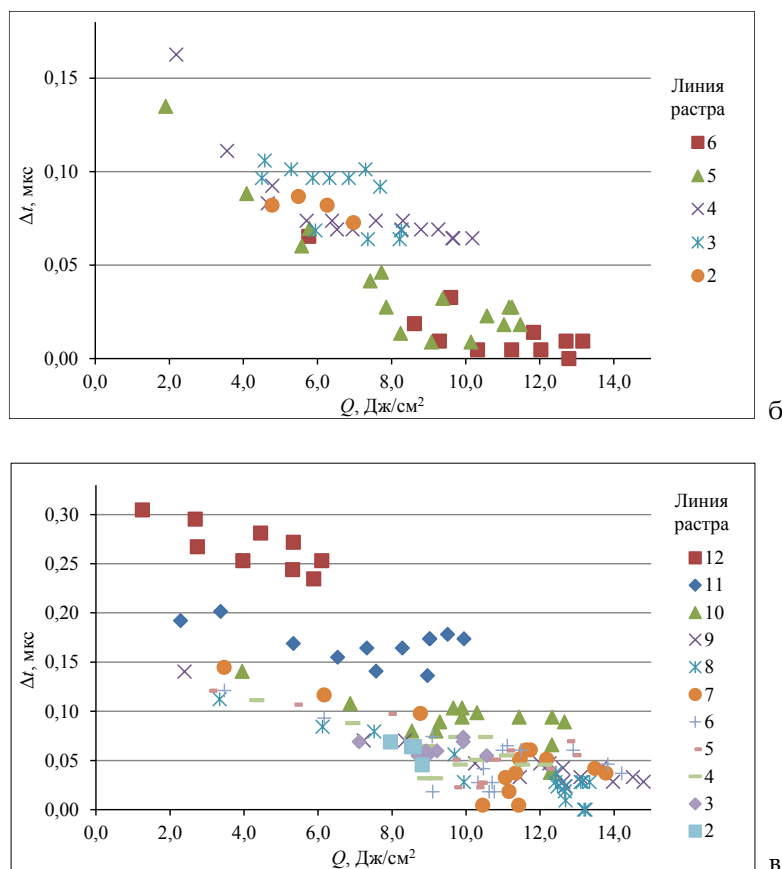
Для оценки эффективности работы плоского заряда при достигнутых уровнях  $Q_{\text{п}}$  с относительным временем выхода ДВ на его тыльную поверхность 50 нс использовали такой параметр, как отношение площади, на которой разновременность выхода ДВ составила  $\leq 50$  нс, к площади облучённой области заряда. Учитывая принципиальную дискретность получаемой информации об относительном времени выхода ДВ, оценивали интересующий нас параметр как число точек с разновременностью выхода ДВ  $\leq 50$  нс, отнесённое к числу точек, попадающих в облучённую зону. Полученные значения в процентах для каждого эксперимента приведены в последнем столбце таблицы 1 и предпоследнем столбце таблицы 2.

Из анализа полученного массива данных о плотности энергии ЛИ, падающей на заряд и относительного времени выхода ДВ ( $\Delta t$ ) на его тыльную сторону оценивали уровень оптимальной плотности энергии ( $Q_{\text{опт}}$ ), при которой в этой области достигаются значения  $\Delta t \leq 50$  нс. То есть для надежного достижения значений  $\Delta t \leq 50$  нс при переходе ко всей облучаемой площади заряда требуется обеспечить значения  $Q_{\text{опт}}$  при условии равномерного распределения энергии по всей площади пятна ЛИ на поверхности заряда. Эти оценки  $Q_{\text{опт}}$  и значения их среднеквадратичных отклонений (СКО) занесены в таблицу 2. Среднее значение  $Q_{\text{опт}}$  вычисленная по всем опытам второй серии составило  $(10 \pm 2)$  Дж/см<sup>2</sup>.

Из полученных массивов данных строили диаграммы рассеяния значений разновременности выхода ДВ от локальных значений плотности энергии в области, ограниченной размерами пятна излучения, как показано на рисунке 5. На указанном рисунке нанесена пунктирная линия, соответствующая полученному среднему значению плотности энергии ЛИ в точках, соответствующих  $\Delta t \leq 50$  нс.  $Q_{\text{опт}} = 10$  Дж/см<sup>2</sup>.



**Рисунок 5а.** Диаграммы рассеяния относительного времени выхода ДВ от плотности энергии ЛИ в пятне ЛИ на заряде (а – опыт №80)



**Рисунок 5б,в.** Диаграммы рассеяния относительного времени выхода ДВ от плотности энергии ЛИ в пятне ЛИ на заряде (б – опыт №82; в – опыт №87)

Как видно из представленных на рисунке 5 данных, в интервале плотностей энергии от  $Q \sim 2$   $Дж/см^2$  до  $Q \sim 8$   $Дж/см^2$  увеличение средней плотности энергии по пятну приводит к уменьшению разновременности выхода ДВ на тыльную сторону заряда от  $\Delta t \sim 200$  нс до  $\Delta t \sim 50$  нс. При дальнейшем увеличении  $Q$  до  $\sim 12$   $Дж/см^2$  среднее значение  $\Delta t$  не превышает 50 нс и практически не изменяется с увеличением значений  $Q$ . При дальнейшем увеличении значений  $Q$  до 14  $Дж/см^2$  можно отметить только слабую тенденцию к снижению  $\Delta t$ . Таким образом, для исследуемого светочувствительного взрывчатого состава на основе гексогена уровень плотности энергии и допустимая разноплотность, при которых разновременность выхода ДВ не превышает 50 нс составляет:

$$Q_{\text{опт}} = (10 \pm 2) \text{ Дж/см}^2$$

По-видимому, полученное значение  $Q_{\text{опт}}$  является критерием возбуждения детонации в исследуемом СВС по всей облученной поверхности заряда с разновременностью  $\Delta t \leq 50$  нс.

### Заключение

В проведённых экспериментах воздействие ЛИ со средней плотностью энергии не ниже 2,8  $Дж/см^2$  вызывало устойчивое взрывчатое превращение исследуемого СВС на основе высокодисперсного гексогена и нанодисперсного алюминия по всей площади мишени. Однако, при этом отчётливо наблюдалось влияние распределения плотности энергии в облучаемом пятне на величину относительного времени выхода ДВ (разновременность) на тыльную поверхность пассивного заряда. С ростом плотности энергии в пятне ЛИ это влияние уменьшается.

На поверхности пассивного заряда, эквивалентной по площади кругу диаметром 23 мм, зарегистрирована разновременность выхода ДВ не более 50 нс.

Таким образом:

- экспериментально показана возможность использования импульсного лазерного излучения для инициирования взрывчатого превращения в тонких слоях СВС с разновременностью, не превышающей 50 нс на больших поверхностях;
- выявлено влияние распределения плотности энергии в пятне облучения на поверхности заряда на разновременность возбуждения ДВ в СВС;
- определено значение плотности энергии ЛИ ( $Q_{\text{опт}} = 10 \pm 2$  Дж/см<sup>2</sup>), достижение которой по всему пятну облучения на поверхности заряда из исследуемого СВС на основе гексогена позволяет обеспечить получение ДВ с разновременностью не более 50 нс.

### Список литературы

1. German V.N., Fisenko A.K., Khokhlov N.P. Laser radiation induced detonation in HE samples produced by thermovacuum deposition // Proc. of the 1998 Life Cycles of Energetic Material. Conference, 29 March – 1 April 1998, Fullerton, USA. P.67
2. Ю.В.Шейков, С.М.Батьянов, О.Н.Калашникова, О.М.Луковкин, Д.В.Мильченко, С.А.Вахмистров, А.Л.Михайлов О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывчатых веществ лазерным излучением // ФГВ. 2018, т. 54, № 5 с.57- 60.
3. Способ изготовления термостойких светочувствительных взрывчатых составов и светодетонаторов на их основе. О.М.Луковкин, Ю.В.Шейков, С.М.Батьянов, С.А.Вахмистров, О.Н.Калашникова, Д.В.Мильченко. Патент РФ № 2637016 от 29.10.2017.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ В ВОЗДУШНОЙ И ВОДНОЙ СРЕДАХ ПРИ ВЗРЫВЕ ГРЕМУЧЕГО ГАЗА, ЗАКЛЮЧЕННОГО В УПРУТУЮ ОБОЛОЧКУ

*В.А. Васекин, Д.В. Гелин, Н.Д. Гелин, Д.А. Лысов, В.А. Марков, М.В. Маркова, А.В. Петюков, М.Ю. Сотский*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Изучение детонационных волн в газах началось достаточно давно, однако в настоящее время вновь наблюдается всплеск интереса к этим явлениям. Продиктовано это, главным образом, стремлением использовать явление детонации в газовых смесях для практических целей в оригинальных импульсных установках и специальных энергетических системах для летательных аппаратов и ракет, в том числе и прототипах импульсного детонационного двигателя.

Известно, что детонационная волна может быть создана двумя разными способами: прямым инициированием и через так называемый процесс перехода горения в детонацию.

В первом случае достаточно мощный источник создает интенсивную ударную волну, за фронтом которой начинается химическая реакция – формируется детонационная волна. Такая ударная волна требует высокой плотности энергии источника.

Во втором случае для воспламенения газовой смеси в трубе используется источник с относительно малой энергией, такой, как искровая свеча зажигания. Турбулизация потока происходит и в гладких трубах; за счет этого увеличивается площадь поверхности пламени. При ускоряющемся движении фронта пламени перед ним формируется волна сжатия. Такая волна увеличивает турбулентность горючего газа, что в свою очередь приводит к дальнейшему ускорению движения фронта пламени и повышению давления перед ним. Возмущения на фронте складываются, его крутизна растет, и в результате возникает ударная волна, сопровождаемая химической реакцией, а значит, и детонация. Наши эксперименты основаны именно на этом физическом процессе.