

УДК 662.215.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗАРЯДОВ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СОСТАВА ПО ПОВЕРХНОСТИ $\approx 1\,000\text{ мм}^2$

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

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва
607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Приведены результаты исследования процессов инициирования взрывного превращения плоских зарядов диаметром 40 мм и толщиной 5 мм из низкоплотного ($\rho \approx 0.9\text{ г/см}^3$) светочувствительного взрывчатого состава (СВС) на основе высокодисперсных гексогена и алюминия. Показана возможность использования лазерного излучения (ЛИ) для инициирования взрывного превращения на большой площади ($\approx 1\,000\text{ мм}^2$) с малой разновременностью выхода фронта детонационной волны. Определено значение плотности энергии ЛИ ($Q_{\text{опт}} = 10\text{ Дж/см}^2$), достижение которой по всему пятну ЛИ на поверхности заряда способно обеспечить разновременность выхода фронта детонационных волн на тыльную поверхность заряда не более 50 нс.

Ключевые слова: лазерное инициирование, светочувствительный взрывчатый состав, взрывное превращение, детонационная волна.

DOI 10.15372/FGV20210312

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность вопросов лазерного инициирования взрывчатых составов связана как с надежностью и безопасностью инициирования зарядов, так и с возможностью генерации плоских ударных волн на большой поверхности, имеющих низкую разновременность выхода.

Особый интерес исследователей вызывают составы на основе тэна с добавками ультрадисперсного алюминия в части исследования зависимости пороговой плотности энергии импульсного лазерного излучения, оценки влияния на параметры взрывного превращения состава взрывчатых веществ (ВВ), плотности, внешнего давления и т. п. [1–6].

Однако авторам не удалось найти публикаций, посвященных лазерному инициированию зарядов светочувствительных ВВ с большой поверхностью и влиянию распределения плотности энергии в сечении лазерного пучка на параметры взрывного превращения в таких зарядах.

Основной целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование взаимосвязи распределения плотности энергии лазер-

ного излучения (ЛИ) в сечении инициирующего лазерного пучка и разновременности выхода фронта детонационной волны (ДВ) на поверхность низкоплотного плоского заряда площадью до $\approx 1\,000\text{ мм}^2$ из светочувствительного состава на основе гексогена и высокодисперсного алюминия. Выбор данного светочувствительного состава обусловлен полученными ранее результатами [2, 3], которые показали, что из алюминизированных составов на основе бризантных ВВ наибольшей чувствительностью к ЛИ обладает светочувствительный взрывчатый состав на основе высокодисперсного гексогена и нанодисперсного алюминия.

Основной задачей исследования было определение условий, обеспечивающих достижение разновременности выхода ДВ на тыльную поверхность заряда на уровне $\approx 50\text{ нс}$. Это значение разновременности выбрано с учетом требований, предъявляемых в ряде прикладных задач.

Исследование включало в себя проведение экспериментов по воздействию на плоские заряды диаметром 40 мм, снаряженные слоем низкоплотного ($\rho = 0.9 \pm 0.1\text{ г/см}^3$) светочувствительного состава толщиной 5 мм и дополнительным зарядом толщиной 2 мм из пластифицированного тэна. Регистрировали парамет-

ры ЛИ (энергию и форму импульса, распределение плотности энергии в облучаемом пятне на мишени) и одновременность выхода фронта ДВ на тыльную поверхность заряда из пластифицированного тэна. Источником ЛИ служила лазерная установка с активным элементом из неодимового стекла, работающая на основной гармонике неодимового лазера в режиме модулирования добротности.

Поскольку в диапазоне длительностей лазерного импульса $7.5 \div 100$ нс их влияние на пороговую плотность энергии выражено слабо (при увеличении длительности импульса в 13.3 раза порог инициирования увеличивается в 1.4 раза) [1, 7], а в данной работе длительность лазерного импульса составила ≈ 100 нс, в качестве основной характеристики ЛИ пользовались средней плотностью энергии, а не плотностью мощности ЛИ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на лазерном исследовательском комплексе, предназначенном для исследований воздействия мощного ЛИ на мишени, содержащие светочувствительные ВВ. В состав этого комплекса входят лазерная установка и малогабаритная взрывозащитная камера с номинальной загрузкой ВВ 100 г в тротиловом эквиваленте.

Лазерная установка с активным элементом из стекла, активированного ионами неодима, обеспечивала генерирование импульсов когерентного оптического излучения в режиме модулированной добротности с длиной волны 1064 нм, длительностью ≈ 120 нс, энергией в импульсе до 200 Дж.

Мишени состояли из корпуса, активного заряда из светочувствительного состава, пассивного заряда из штатного пластифицированного ВВ и отсечки. Для снаряжения активного заряда использовали разработанный ранее состав на основе высокодисперсного гексогена с нанодисперсным алюминием (средний размер частиц 100 нм, марка УДА1-100-8, кремнийорганическое покрытие, производство ИНЭПХФ им. В. Л. Тальрозе ФИЦ ХФ РАН, г. Москва) [2, 8]. Схема и фотография мишени приведены на рис. 1.

На рис. 2 представлена схема лазерного исследовательского комплекса с оптическими элементами и приборами контроля, расположенными на оси отраженного лазерного луча. Для

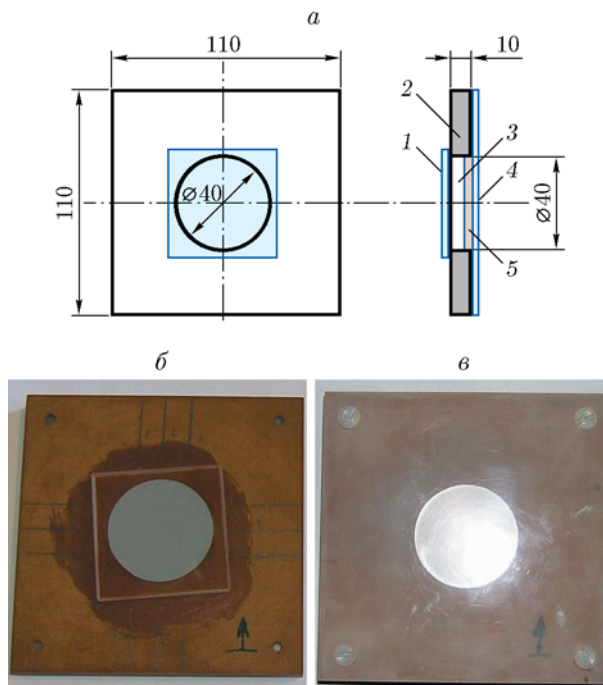


Рис. 1. Схема мишени (а) и ее фотографии с передней (б) и тыльной (в) сторон:

1 — подпор (стекло), 2 — корпус (текстолит), 3 — заряд ВВ (содержит слои светочувствительного взрывчатого состава и пластифицированного тэна), 4 — отсечка (полиметилметакрилат), 5 — воздушный зазор, заполненный бязью

измерения энергии ЛИ использовали цифровой и аналоговый калориметрические измерители, для регистрации пространственного распределения энергии — скоростной электронно-оптический регистратор (ЭОР).

Форму импульса излучения регистрировали двумя фотозементами ФЭК-09. Один из них регистрировал профиль моноимпульса, другой использовали для контроля качества работы ЛИ в режиме модулированной добротности. В качестве регистраторов применялся цифровой осциллограф с полосой пропускания 100 МГц. На рис. 3 приведена типичная осциллограмма, получаемая в опыте с прибором контроля параметров излучателя, с различной разверткой по времени.

Ранее (в работе [2]) было показано, что при лазерном инициировании в зарядах из используемого взрывчатого состава 5×5 мм, плотностью 0.9 ± 0.1 г/см³ реализуется взрывное превращение в виде детонации. Регистрацию выхода ДВ на тыльную сторону заряда проводили с использованием скоростного фоторегистратора, работающего в режиме растро-

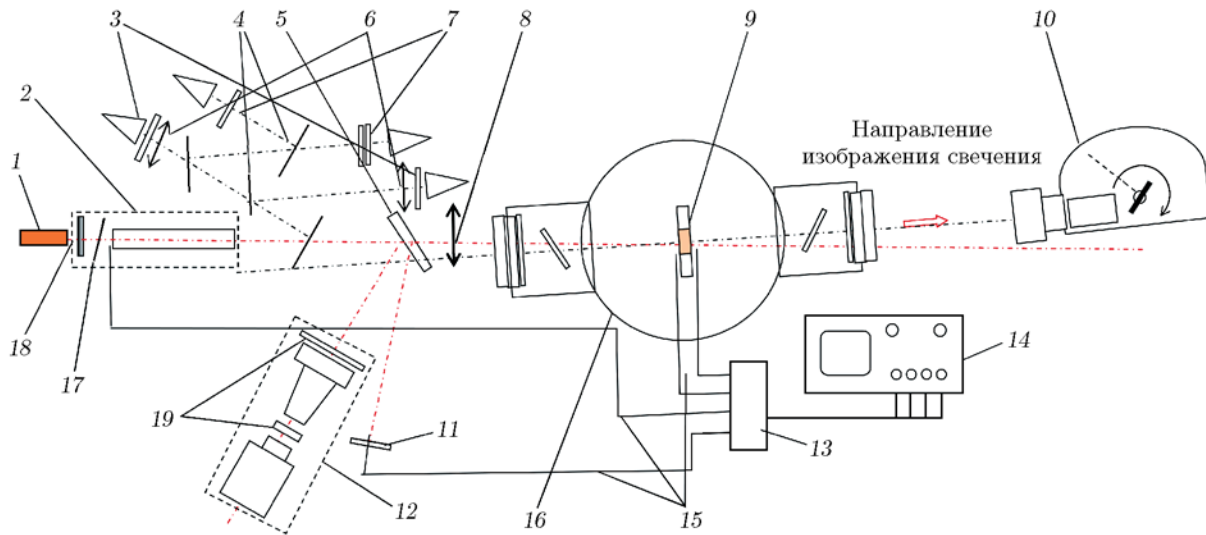


Рис. 2. Схема лазерного исследовательского комплекса:

1 — юстировочный лазер газовый ЛГ-72, 2 — генератор когерентного излучения, 3 — головки calorиметрических измерителей, 4 — светоделительные пластины, 5 — светоделительный клин, 6 — фокусирующие линзы, 7 — светофильтры, 8 — линза, 9 — мишень, 10 — скоростной фоторегистратор, 11 — контрольная фотобумага, 12 — ЭОР, 13 — фотооптический электронный преобразователь, 14 — осциллограф, 15 — оптоволоконные шнуры, 16 — малогабаритная взрывозащитная камера, 17 — пленка взрывного затвора, 18 — зеркало резонатора $R = 0.99$, 19 — светофильтры ЭОР

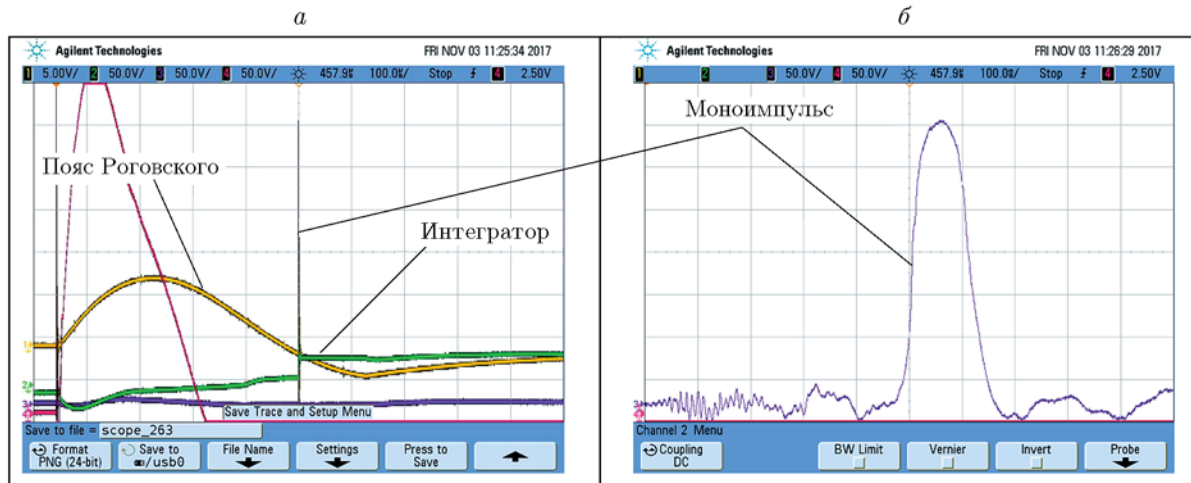


Рис. 3. Типичная осциллограмма электрических сигналов:

a — пояс Роговского и интегратор, *б* — моноимпульс

вой съемки с шагом раstra 0.5 и 0.25 мм. Скорость развертки изображения по фокальной дуге соответствовала 3 км/с.

Для выявления качественной картины распределения энергии по облучаемому пятну нефокусированный лазерный луч, отраженный от светоделительного клина, направляли на фотобумагу, степень потемнения которой качественно отражала распределение плотности энергии ЛИ по сечению пучка. Используя по-

лученные изображения на фотобумаге, проводили корректировку положения центра пятна излучения относительно центра мишени и луча юстировочного газового лазера.

Для количественных оценок пространственного распределения энергии ЛИ регистрировали изображение пятна излучения с использованием скоростного ЭОР с последующей компьютерной обработкой этого изображения. Применяемый регистратор, испол-

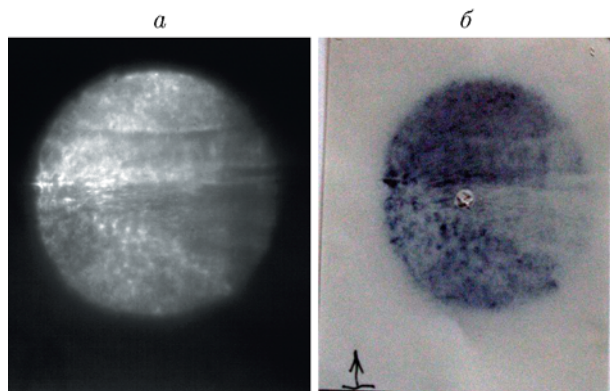


Рис. 4. Отображение распределения энергии импульса лазерного излучения по сечению пучка, зарегистрированное на ЭОР (а) и на фотобумаге (б) в одном и том же эксперименте

ненный на матричном полупроводниковом детекторе с размерами чувствительной области 15.6×15.3 мм (разрешение 2048×2048 пикселей) и оснащенный электронным затвором и светосильным длиннофокусным объективом, обеспечивал однокадровую регистрацию с экспозицией от 500 нс и динамическим диапазоном до 76.5 дБ. Открытие и закрытие электронного затвора ЭОР задавалось параметрами управляющего сигнала, контролируемого с помощью осциллографа.

В состав ЭОР входили светофильтры (поз. 19 на рис. 2). Они устанавливались на входе объектива с целью предохранения от повреждения покрытий просветленной оптики лазерным излучением, а также после объектива для ослабления излучения энергии до плотностей, попадающих в диапазон линейности ПЗС-матрицы.

На рис. 4 представлены изображения распределения энергии импульса лазерного излучения по сечению пучка, зарегистрированные на ПЗС-матрице ЭОР и на фотобумаге.

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

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все изготовленные для опытов мишени имели диаметр заряда 40 мм (см. рис. 1). Для последовательного повышения плотности энергии ЛИ, падающего на заряд, изменяли такие

параметры ЛИ, как энергия моноимпульса на выходе излучателя $E_{\text{вых}}$ и диаметр сфокусированного на мишени пятна $d_{\text{п}}$.

Первые опыты на плоских зарядах при воздействии ЛИ со средней плотностью энергии $Q_{\text{п}} \approx 3$ Дж/см² ($Q_{\text{п}} = E_{\text{п}}/S_{\text{п}}$, где $E_{\text{п}}$ — энергия в пятне ЛИ, падающего на мишень, $S_{\text{п}}$ — площадь пятна ЛИ на мишени) показали, что воздействие такого ЛИ вызывает устойчивое взрывное превращение на всей площади заряда, 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 взрывного превращения весьма далек от условий формирования плоской ДВ.

На основании результатов первых опытов сформулированы требования к параметрам ЛИ и характеристикам заряда в дальнейших экспериментах. В частности, для плоских активных мишеней средняя плотность энергии $Q_{\text{п}}$ должна быть не менее 5 Дж/см², толщина слоя светочувствительного состава — не менее 5 мм.

В табл. 1, 2 представлены характерные результаты, полученные в экспериментах по воздействию ЛИ на плоские слои светочувствительного состава на основе гексогена в исследуемых мишенях при последовательном увеличении плотности энергии в пятне ЛИ $E_{\text{п}}$.

Для упрощения интерпретации результатов эксперименты разделены на две серии:

- 1 — с диаметром пятна ЛИ, падающего на заряд, больше диаметра заряда;
- 2 — с диаметром пятна ЛИ меньше диаметра заряда.

В табл. 1, 2 на предварительных снимках штриховой и сплошной линиями 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 варьировались от 2.8 до 4.7 Дж/см². На зарегистрированных растрограммах наблюдалась тенденция уменьшения 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, к общей площади заряда.

На имеющейся установке не было возможности варьировать распределение плотности энергии ЛИ в пучке, поэтому во второй серии опытов увеличили плотность энергии, падающей

шей на заряд. При этом контролировали распределение энергии в пятне излучения для сопоставления значений разновременности выхода ДВ с плотностью энергии ЛИ в локальных областях поверхности заряда.

Во второй серии опытов повышение плотности энергии, падающей на заряд, достигалось за счет фокусировки пучка ЛИ на мишени до размеров его пятна, не превышающих диаметра заряда. Распределение плотности энергии в пятне ЛИ измеряли с использованием ЭОР, описанного ранее.

Среднюю плотность падающей на мишень энергии варьировали в диапазоне $Q_{\text{п}} = 6.3 \div 8.4$ Дж/см². Результаты обработки растровых программ представляли в виде значений относительного времени выхода ДВ (Δt) на тыльную сторону заряда. По полученным значениям Δt строились цветовые карты разновременности выхода ДВ по всей площади заряда (см. табл. 1, 2).

Распределение плотности энергии в пятне ЛИ (третья графа в табл. 2) получали по результатам обработки изображения, регистрируемого ЭОР. Учитывая то, что энергия ЛИ после прохождения светофильтров ослаблялась до плотностей, находящихся в диапазоне линейности матрицы, плотность энергии в выбранной области ЛИ определяли по формуле

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

где $Q_{\text{обл}}$, $I_{\text{обл}}$ — соответственно плотность энергии ЛИ и сумма яркости пикселей в выбранной области, $E_{\text{полн}}$, $I_{\text{полн}}$ — энергия и сумма яркости пикселей во всем 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 видоизмененную формулу (1):

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

где I_{pix} — яркость выбранного пикселя, S_{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 расчета разновременности выхода ДВ (в дальнейшем эти области также будем называть точками). Полученные результаты опытов представляли в виде массива данных, в которых приводили значения относительного времени выхода ДВ на тыльную поверхность (Δt) и локальной плотности энергии ЛИ (Q) в одних и тех же точках заряда.

Для оценки эффективности работы плоского заряда при достигнутых уровнях $Q_{\text{п}}$ использовали такой параметр, как отношение площади, на которой разновременность выхода ДВ составила ≤ 50 нс, к площади облученной области заряда. Учитывая принципиальную дискретность получаемой информации об относительном времени выхода ДВ, интересующий нас параметр оценивали как число точек с разновременностью выхода ДВ $\Delta t \leq 50$ нс, отнесенное к числу точек, попадающих в облученную зону. Полученные для каждого эксперимента значения приведены в последней графе табл. 1 и предпоследней графе табл. 2.

На основе анализа полученного массива данных о плотности энергии ЛИ, падающей на заряд, и относительного времени выхода ДВ на его тыльную сторону оценивали уровень оптимальной плотности энергии ($Q_{\text{опт}}$), при которой в этой области достигаются значения $\Delta t \leq 50$ нс. Предполагается, что для надежного их достижения при переходе ко всей облучаемой площади исследуемого заряда требуется обеспечить значения $Q_{\text{опт}}$ при условии равномерного распределения энергии по всей площади пятна ЛИ. Эти оценки $Q_{\text{опт}}$ и значения их среднеквадратичных отклонений приведены в последней графе табл. 2. Во второй серии опытов среднее значение $Q_{\text{опт}}$ составило 10 ± 2 Дж/см².

С использованием полученных массивов данных строили диаграммы разброса значений разновременности выхода ДВ в зависимости от локальных значений плотности энергии в области, ограниченной размерами пятна излучения, как показано на рис. 5. Штриховая линия на рис. 5 соответствует осредненному значению $Q_{\text{опт}} = 10 \pm 2$ Дж/см².

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из полученных результатов, увеличение средней плотности энергии по пятну логично приводит к уменьшению разновременности выхода ДВ на тыльную сторону заря-

Таблица 1

Результаты первой серии опытов


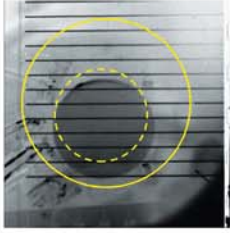
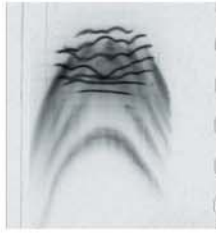
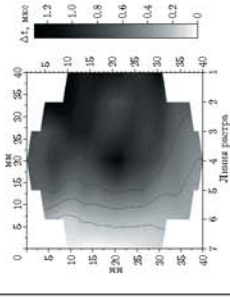
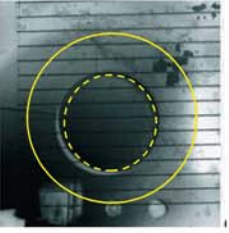

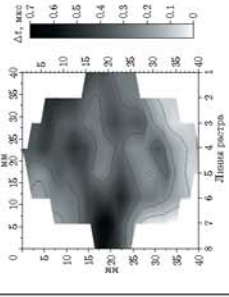


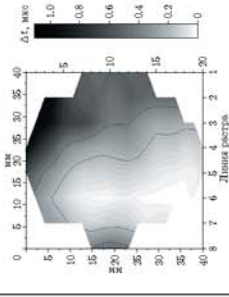
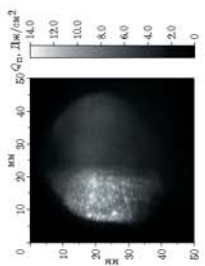
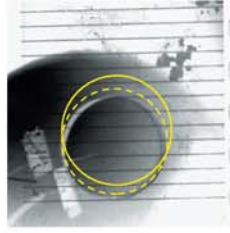
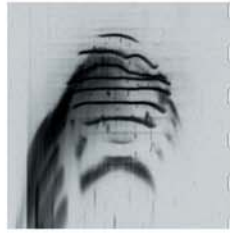
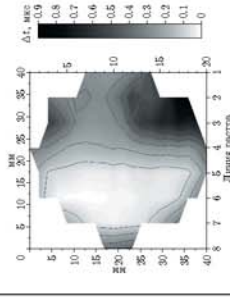
Номер опыта	Параметры ЛИ	Распределение плотности энергии по пятну ЛИ	Предварительный снимок тыльной стороны мишени	Растрограмма выхода ДВ	Карта относительного времени выхода ДВ	Доля площади заряда с $\Delta t \leq 50$ нс, %
66	$d_{п} = 73$ мм $E_{вых} = 170$ Дж $E_{п} = 117$ Дж $S_{п} = 41.9$ см ² $Q_{п} = 2.8$ Дж/см ²	 <p>Нет измерений</p>				6
73	$d_{п} = 73$ мм $E_{вых} = 196$ Дж $E_{п} = 135$ Дж $S_{п} = 41.9$ см ² $Q_{п} = 3.2$ Дж/см ²	<p>Нет измерений</p>				3
76	$d_{п} = 44$ мм $E_{вых} = 103$ Дж $E_{п} = 65.2$ Дж $S_{п} = 15.2$ см ² $Q_{п} = 4.3$ Дж/см ²	<p>Нет измерений</p>				13
79	$d_{п} = 41.5$ мм $E_{вых} = 108.5$ Дж $E_{п} = 63.2$ Дж $S_{п} = 13.5$ см ² $Q_{п} = 4.7$ Дж/см ²					24

Таблица 2

Результаты второй серии опытов

Номер опыта	Параметры ЛИ	Распределение плотности энергии по пятну ЛИ	Предварительный снимок тыльной стороны мишени	Растрограмма выхода ЛВ	Карта относительного времени выхода ЛВ	Доля площади заряда с $\Delta t \leq 50$ нс, %	Q_{opt} , Дж/см ²
80	$d_{п} = 39.2$ мм $E_{вых} = 131$ Дж $E_{п} = 76.3$ Дж $S_{п} = 12.1$ см ² $Q_{п} = 6.3$ Дж/см ²					37	8.1 ± 1.6
82	$d_{п} = 34.6$ мм $E_{вых} = 112$ Дж $E_{п} = 65$ Дж $S_{п} = 9.4$ см ² $Q_{п} = 6.9$ Дж/см ²					30	10.1 ± 1.9
87	$d_{п} = 36.6$ мм $E_{вых} = 152$ Дж $E_{п} = 88.5$ Дж $S_{п} = 10.5$ см ² $Q_{п} = 8.4$ Дж/см ²					42	11.2 ± 2.1

Примечание. Площадь пятна ЛИ меньше площади заряда.

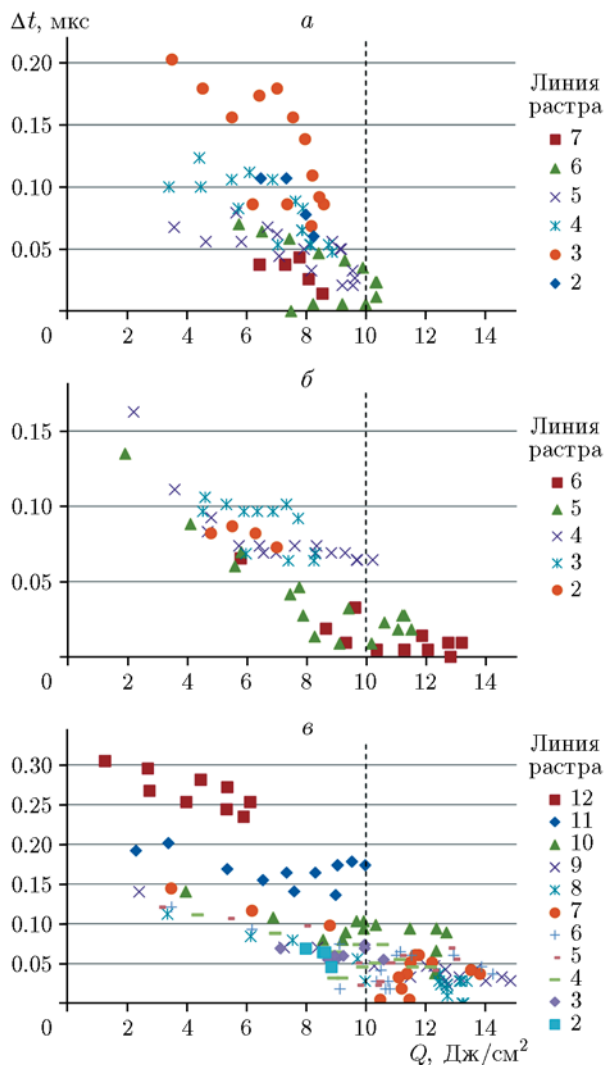


Рис. 5. Диаграммы рассеяния относительного времени выхода ДВ от плотности энергии ЛИ в пятне ЛИ на заряде:

a — опыт № 80, *б* — опыт № 82, *в* — опыт № 87

да. Соотнося локальные значения относительного времени выхода ДВ Δt с энергией ЛИ в локальных точках пятна излучения, отметим, что область $\Delta t < 50$ нс не зависит от энергии, если ее значение превышает $Q_{\text{опт}}$. В области пониженных локальных плотностей энергии $Q_i < Q_{\text{опт}}$ значения Δt превышают 50 нс.

Это позволило оценить минимальный уровень $Q_{\text{опт}}$ в каждом опыте, при котором $\Delta t \leq 50$ нс, при условии, что указанный уровень энергии равномерен по пятну ЛИ. Осредненный уровень плотности энергии ЛИ $Q_{\text{опт}}$, оцененный по результатам всех проведенных экспериментов, составил 10 ± 2 Дж/см². Таким

образом, можно утверждать, что полученное значение $Q_{\text{опт}}$ является критерием возбуждения устойчивой детонации в исследуемом светочувствительном составе по всей облученной поверхности заряда с $\Delta t \leq 50$ нс.

Поэтому при использовании исследуемого светочувствительного состава для достижения одновременности выхода ДВ 50 нс и менее требуется достичь равномерного распределения плотности энергии падающего излучения порядка $Q_{\text{опт}} = 10 \pm 2$ Дж/см² и выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных экспериментах воздействие ЛИ со средней плотностью энергии не ниже 2.8 Дж/см² вызывало устойчивое взрывное превращение исследуемого светочувствительного состава на основе высокодисперсного гексогена и ультрадисперсного алюминия по всей площади заряда. Однако при этом отчетливо наблюдалось влияние распределения плотности энергии в облучаемом пятне на относительное время выхода ДВ (разновременности выхода ДВ) на тыльную поверхность пассивного заряда. С ростом плотности энергии в пятне ЛИ это влияние уменьшается.

Таким образом,

- экспериментально показана возможность использования импульсного лазерного излучения для инициирования взрывного превращения в тонких слоях светочувствительного состава с разновременностью выхода ДВ, не превышающей 50 нс, на больших поверхностях;

- выявлено влияние распределения плотности энергии в сечении пучка ЛИ на разновременность возбуждения ДВ в светочувствительном составе;

- определена плотность энергии ЛИ по всему пятну ($Q_{\text{опт}} = 10 \pm 2$ Дж/см²) на поверхности заряда из исследуемого светочувствительного состава, которая способна обеспечить достижение одновременности выхода фронта ДВ на тыльную поверхность заряда на уровне ≈ 50 нс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова А. А., Зинченко А. Д., Санин И. В., Таржанов В. И., Токарев Б. Б. Временные характеристики инициирования тэна лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 5. — С. 760–766.

2. Шейков Ю. В., Батьянов С. М., Калашникова О. Н., Луковкин О. М., Мильченко Д. В., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л. О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывчатых веществ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 57–60. — DOI: 10.15372/FGV20180508.
3. Луковкин О. М., Шейков Ю. В., Батьянов С. М., Вахмистров С. А., Калашникова О. Н., Мильченко Д. В. Способ изготовления термостойких светочувствительных взрывчатых составов и светодетонаторов на их основе: пат. РФ № 2637016 от 29.10.2017.
4. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Нелюбина Н. В. Влияние плотности композитов тэн — алюминий на пороги взрывчатого разложения при лазерном инициировании // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 93–98. — DOI: 10.15372/FGV20190613.
5. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Звекон А. А., Нелюбина Н. В. Лазерное инициирование тэна с включениями наночастиц алюминия при приложении статического давления // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 2. — С. 127–134. — DOI: 10.15372/FGV20190213.
6. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Нелюбина Н. В., Лисков И. Ю. Пороги инициирования и динамические характеристики взрыва для тонких образцов композитов тэн — Al при лазерном инициировании // Журн. техн. физики. — 2019. — Т. 89, № 6. — С. 912–918.
7. Александров Е. И., Ципилев В. П. Исследование влияния длительности возбуждающего импульса на чувствительность азида свинца к действию лазерного излучения // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 6. — С. 104–109.
8. 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 Conf., 29 March — 1 April 1998, Fullerton, USA. — P. 67.

Поступила в редакцию 19.11.2019.

После доработки 27.03.2020.

Принята к публикации 27.11.2020.
