УДК 538.521

ВИДЕОРЕГИСТРАЦИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА

С. И. Герасимов^{1,2,3,4}, Н. А. Трепалов¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, s.i.gerasimov@mail.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607186 Саров

³Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева, 603950 Нижний Новгород

⁴Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН, 603024 Нижний Новгород

Представлены экспериментальные данные о параметрах воздушной ударной волны при инициировании светочувствительного состава BC-2 излучением лазерного диода. Для регистрации распространения фронта воздушной ударной волны использовался теневой фоновый метод. Визуализация фронта воздушной ударной волны проводилась с применением кросскорреляционной обработки. Получены эмпирические зависимости, характеризующие распространение фронта воздушной ударной волны, образованной от инициирования светочувствительного состава произвольной массы. Экспериментально подтверждена возможность инициирования светочувствительного состава BC-2 с помощью электровоспламенителя ЭВ-15.

Ключевые слова: высокоскоростная видеорегистрация, теневой фоновый метод, светочувствительный состав, воздушная ударная волна, электровоспламенитель, рентгеновская регистрация.

DOI 10.15372/FGV20190512

ВВЕДЕНИЕ

инициирующие Светочувствительные взрывчатые вещества нашли применение технических устройствах в конкретных гражданского и военного назначения [1]. Перспективным классом светочувствительных взрывчатых веществ являются некоторые из координационных соединений тяжелых и переходных металлов. Первоначально в качестве нового взрывчатого вещества в капсюляхдетонаторах был предложен перхлорат (5цианотетразолато-N₂)пентаамминкобальта

(III) (вещество СР) [2]. Затем в качестве одного из наиболее эффективных инициирующих взрывчатых веществ был предложен перхлорат тетрааммин-цис-бис(5-нитротетразолато-N₂)кобальта (III) (вещество BNCP) [3]. Заряды BNCP в электрических и лазерных детонаторах распадаются в режиме перехода горения в детонацию и выполняют функцию как первичного, так и вторичного, бризантного взрывчатого вещества. При этом BNCP менее чувствителен к удару на копре, чем тэн. Свето-

чувствительные комплексные перхлораты СР и BNCP нашли широкое применение в оптических средствах инициирования, функционирующих под действием лазерного излучения. В последующем был получен целый ряд комплексных соединений *d*-металлов с высокими потенциалами ионизации, реакционноспособными высокоэнтальпийными лигандами и эффективными анионами-окислителями [4, 5]. Это, прежде всего, перхлорат (5-гидразо-1Н-тетразол)ртути (II) (ВС-2), соединение серебра, являющееся первым представителем нового класса координационных соединений комплексных перхлориламидов, и перхлорат ди-(3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол)меди (II). Эти соединения демонстрируют экстремально высокую восприимчивость к лазерному моноимпульсу. Для первого из них пороговая энергия инициирования составляет около 5 мДж/см², для двух других она несколько выше.

Состав ВС-2 предлагается использовать в ряде прикладных задач, связанных с тестированием прочности материалов и конструкций при одновременном нагружении их поверхно-

[©] Герасимов С. И., Трепалов Н. А., 2019.

сти продуктами взрыва: с использованием беспроводного инициирования в различных оптически прозрачных средах, а также инициирования штатными электровоспламенителями. Поэтому было проведено исследование инициирования тэна стандартным колпачком с составом BC-2.

Одним из показателей, характеризующих энергетику взрывчатого вещества, является воздушная ударная волна (ВУВ) с ее характерными параметрами. Наиболее полную информацию о форме ВУВ и ее распространении в пространстве можно получить на основе высокоскоростной видеорегистрации процесса взрыва. Особенно важен и интересен для рассмотрения начальный участок возбуждения ВУВ. В данном эксперименте применен теневой фоновый метод для видеорегистрации распространения ВУВ, созданной при инициировании светочувствительного взрывчатого состава. Полученные данные позволили определить скорость распространения фронта ВУВ и избыточное давление во фронте ВУВ.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Светочувствительный взрывчатый состав ВС-2

Основой светочувствительного взрывчатого состава ВС-2 является комплексный перхлорат ртути (II) с 1-H-5-гидразинотеразолом в качестве лиганда [6]. При приготовлении энергонасыщенного светочувствительного состава ВС-2 в качестве инертной матрицы (связующего) используется оптически прозрачный полимер — сополимер 2-метил-5винилтетразола (\approx 98 %) и метакриловой кислоты (\approx 2 %). Готовый состав содержит 10 % полимера и 90 % комплексного перхлората ртути (II). Состав ВС-2 представляет собой белое кристаллическое вещество с плотностью монокристалла 3.45 г/см³ [7, 8].

В экспериментах использовался светочувствительный элемент, состоящий из состава ВС-2 массой ≈ 0.1 г, помещенного в латунный колпачок.

В [9] продемонстрирована возможность инициирования сборки из нескольких колпачков с составом ВС-2 некогерентным излучением. Схема экспериментальных исследований представлена на рис. 1. Сборка из пяти светочувствительных элементов устанавливалась



Рис. 1. Схема опыта:

1 — рентгеновский источник, 2 — пульт управления, 3 — генератор задержанных импульсов, 4 — накопитель электрической энергии, 5 — защищенная кассета с рентгеновской пленкой, 6 — свинцовая маска-поглотитель излучения, 7 — некогерентный источник света, 8 — экспериментальная сборка

вдоль стримерной дорожки газоразрядного линейного генератора некогерентного излучения, питанием для которого служил накопитель электрической энергии (150 Дж, 15 кВ). Управление запуском накопителя энергии и рентгеновского источника осуществлялось с помощью генератора задержанных импульсов. Интервалы времени съемки в четырех экспериментах выбраны равными 0, 5, 10, 30 мкс от момента генерации светового импульса. Результаты рентгеновской регистрации приведены на рис. 2. Полученные данные свидетельствуют об относительной синхронности детонации. Разновременность инициирования светочувствительных элементов в сборке находится в диапазоне ± 3 мкс [9], что удовлетворяет условиям решения большинства газодинамических задач [10]. Время инициирования не превышает 10 мкс [9].

Дополнительно была экспериментально опробована возможность инициирования BC-2 электровоспламенителем ЭВ-15 (ОСТ 84-124-75), являющимся миниатюрным (Ø5.35 × 5.5 мм) средством инициирования мелкодисперсных зерненых порохов. Испытывалась сборка с тэном, находящимся в составе детонирующего шнура ДШЭ-12 (ГОСТ 6196-78). Фрагменты видеорегистрации процесса инициирования и фотография пластины-свидетеля после проведения опыта представлены на рис. 3. Результаты подтверждают инициирование состава BC-2 электровоспламенителем



Рис. 2. Рентгенографические снимки процесса детонации

'ЭВ-15 с последующим возбуждением стационарной детонации в бризантном энергонасыщенном веществе (тэн).

В работе [11] продемонстрирована возможность инициирования светочувствительного элемента излучением лазерного диода. Данный способ применялся в наших экспериментах с использованием видеорегистрации ВУВ.

1.2. Схема регистрации

С целью регистрации ВУВ, созданной при инициировании состава ВС-2, светочувствительный элемент устанавливался на высоте ≈1.5 м в монтажное сквозное отверстие платы из оргстекла (рис. 4). Облучение состава ВС-2 лазерным диодом осуществлялось в режиме моноимпульса длительностью 1 с. Длительность импульса выбрана с большим запасом в целях безопасности проведения эксперимента в



Рис. 4. Расположение элементов схемы инициирования:

1 — элемент светочувствительный, 2 — пластина из оргстекла, 3 — излучатель (лазерный диод)

случае неточной фокусировки лазерного диода. Схема инициирования и оптической регистрации приведена на рис. 5.

Схема инициирования включает в себя излучатель (2) на основе лазерного диода, источник питания (4), блок управления (3) и генератор импульсов (5). Блок управления осуществляет коммутацию источника питания для работы лазерного диода на время, заданное с помощью генератора импульсов.

Видеорегистрация распространения ВУВ, созданной при инициировании состава ВС-2, осуществлялась теневым фоновым методом [12] в условиях внешней подсветки. В момент инициирования ВС-2 (появление светового излучения) фотоприемное устройство (6 на рис. 5) производит запуск высокоскоростной видеокамеры (7) и импульсного газоразрядного источника света ИИС-5 (8). Амплитудная си-



Рис. 3. Фрагмент виде
орегистрации процесса инициирования сборки с помощью электровоспламенител
я $\mathbf{ ЭB-15}$



Рис. 5. Схема проведения эксперимента:

1 — элемент светочувствительный, 2 — излучатель (лазерный диод), 3 — схема управления, 4 источник питания, 5 — генератор импульсов, 6 фотоприемное устройство, 7 — высокоскоростная видеокамера, 8 — импульсный источник света, 9 — фоновый экран

ла света ИИС-5 $6 \cdot 10^6$ кд ± 15 % и длительность импульса \approx 5 мс обеспечивают достаточную освещенность фонового экрана (9) на время регистрации (нахождение ВУВ в кадре). Частота съемки составляла 9 300 кадр/с, время экспозиции 6.76 мкс. В качестве фонового экрана использовался искусственно генерированный экран с гауссовским шумом, состоящий из элементов квадратной формы. Размер зерна экрана выбирали таким образом, чтобы на один элемент экрана приходилось 4 пкс матрицы видеокамеры.

1.3. Результаты регистрации

На рис. 6 представлен один из кадров видеорегистрации, полученный в момент времени 0.8 мс после инициирования состава BC-2.

Условия проведения опытов: температура окружающего воздуха 6 °C, атмосферное давление 99 125.2 Па, относительная влажность воздуха 95 %.

Для визуализации ВУВ полученную видеоинформацию обрабатывали с помощью программы PIVview (демоверсия). Использовался многопроходный кросскорреляционный алгоритм обработки с квадратным окном опроса и 50%-м перекрытием. Размер окна опроса итерационно уменьшался с 192 до 8 пкс. Аппроксимацию корреляционной функции проводили с помощью трехточечной гауссовой интерполяции без предварительной обработки изображе-



Рис. 6. Фрагмент результатов видеорегистрации:

1 — продукты взрыва, 2 — излучатель (лазерный диод), 3 — фоновый экран

ний. Между итерациями кросскорреляционного метода к результирующему полю применялся медианный фильтр с размером маски 3 × 3. Результаты обработки с временной привязкой к началу взрыва представлены на рис. 7. На начальном этапе распространения ВУВ наблюдалась несферичность фронта, уменьшающаяся с течением времени. Несферичность обусловлена конструкцией светочувствительного элемента и его оправки (пластина из оргстекла) для фиксации в пространстве. Начиная с момента времени 0.582 мс после инициирования ВС-2 наблюдается движение «осколка», опережающего фронт ВУВ.

1.4. Определение параметров ВУВ

По результатам визуализации ВУВ была построена диаграмма распространения фронта ВУВ, и затем найдено избыточное давление во фронте. Параметры ВУВ определяли по алгоритму, изложенному в работе [13].

С учетом несферичности ВУВ осредненное значение радиуса фронта R' вычислялось по формуле

$$R' = m\sqrt{S/\pi},\tag{1}$$

где *т* — масштабный коэффициент, *S* — площадь изображения, ограниченная фронтом ВУВ.

Для определения площади *S* использовался программный комплекс ImageJ — свободно распространяемое кроссплатформенное программное обеспечение. С учетом особенностей



Рис. 7. Результаты визуализации: 1 — фронт ВУВ, 2 — продукты взрыва, 3 — осколок



Рис. 8. Схема оптической регистрации: 1 — фронт ВУВ, 2 — высокоскоростная видеокамера

оптической схемы регистрации ВУВ сферической формы (рис. 8) радиус фронта ВУВ R определялся по формуле

$$R = Z \sin[\operatorname{arctg}(R'/Z)], \qquad (2)$$

где Z — отстояние высокоскоростной видеокамеры от места установки BC-2.

На рис. 9 представлены данные о распространении фронта ВУВ, полученные в двух



Рис. 9. Распространение фронта ВУВ в опытах (1, 2) и аппроксимирующая зависимость (4) с учетом радиуса R_0 (3)

опытах. Ошибка определения радиуса фронта ВУВ обусловлена пространственным разрешением оптической системы регистрации, ее среднеквадратичное отклонение составило 0.9 мм. Результаты экспериментов были дополнены значением $R_0 = 1.96$ мм (радиус сферы, соответствующий объему ВС-2 в составе светочувствительного элемента) в момент времени t = 0. Результирующий массив данных был аппроксимирован зависимостью

$$R(t) = A + Bc_0 t + C \ln(1 + c_0 t) + D\sqrt{\ln(1 + c_0 t)},$$
 (3)

где A, B, C, D — коэффициенты аппроксимации, c_0 — скорость звука в невозмущенной среде 334.85 м/с (при температуре окружаюцей среды 6 °C). Получено, что коэффициенты аппроксимации функции (3) составляли: A = $2.163 \cdot 10^{-3}, B = 1.095, C = -0.302$ и D = 0.244. Путем дифференцирования зависимости R(t)найдена скорость распространения ВУВ, значения которой использовались для вычисления избыточного давления во фронте ВУВ:

$$\Delta p = \frac{2\rho_0}{k+1} \left(D_f^2 - c_0^2 \right), \tag{4}$$

где $\rho_0 = 1.238 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха в невозмущенной среде при температуре окружающей среды 6 °С и давлении в невозмущенной области 99 125.2 Па; k = 1.4 — показатель адиабаты Пуассона для воздуха; D_f — скорость фронта ВУВ, м/с; $c_0 = 334.85$ м/с. Результирующая зависимость приведена на рис. 10.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На практике часто используется моделирование, под которым понимается предсказание параметров натурных взрывных волн по параметрам взрывов, проводимых в уменьшенных масштабах и в облегченных условиях.

 Δp , κΠα 55504540353025201510 0.150.200.250.300.35*R*, м

Рис. 10. Экспериментальная зависимость избыточного давления во фронте ВУВ

В основе такого моделирования лежит принцип кубического корня, впервые сформулированный Хопкинсоном в 1915 г. [14] и независимо Кранцем в 1926 г. [15]. Моделирование по методу Хопкинсона — Кранца справедливо только при давлении окружающей среды и скорости звука в ней, при которых сделаны измерения. Зависимости параметров взрывных волн от геометрических и энергетических величин нельзя назвать универсальными, так как они не отражают влияния начального давления и скорости звука в среде. Более подходящими для описания параметров взрывных волн являются переменные Сахса [16]. Метод Сахса учитывает изменения атмосферного давления и температуры.

Экспериментальные данные по распространению фронта ВУВ (см. 1–3 на рис. 9) были приведены к безразмерному виду по методу Сахса и по формулам [17]

$$R_s = R/S, \quad t_s = ct/S,$$

$$S = \sqrt[3]{W} \sqrt[3]{101.325/p}, \quad c = \sqrt{T/288.6},$$
(5)

где R, t — измеренный радиус и соответствующее ему время дискретного положения ВУВ; S, t_s — масштабные коэффициенты; W — масса заряда, кг; p и T — давление и температура окружающего воздуха при проведении эксперимента, кПа и K соответственно.

Полученные данные были аппроксимированы зависимостью (рис. 11)

$$R_s(t_s) = A + Bc_0 t_s + C \ln(1 + c_0 t_s) + D\sqrt{\ln(1 + c_0 t_s)}, \quad (6)$$

где скорость звука в невозмущенной среде c_0 соответствует нормальным климатическим условиям ($c_0 = 340.9 \text{ м/c}$). Для ВС-2 по результатам экспериментов коэффициенты аппроксимации функции (6) составили: A = 0.042, B = 1.066, C = -0.452 и D = 1.481.

На рис. 12 приведены экспериментальные данные по распространению фронта ВУВ от состава ВС-2 и других взрывчатых веществ [13, 17–19]. Все опыты выполнялись при нормальных климатических условиях с массой взрывчатого вещества 1 кг. Как видно из графиков, на начальном этапе динамика фронта ВУВ для состава ВС-2 сравнима с данными для азида свинца, а с момента времени 7.5 мс сопоставима с данными для тротила.



Рис. 11. Диаграмма распространения фронта ВУВ в приведенных координатах:

1 — экспериментальные значения, 2 — аппроксимирующая зависимость



Рис. 12. Динамика распространения фронта ВУВ при подрыве взрывчатого вещества массой 1 кг при нормальных климатических условиях:

1 — ВС-2, 2 — ПВВ-7 [8], 3 — ТНТ [12], 4 — тэн [13], 5 — перекись ацетона [13], 6 — азид свинца [14]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам видеорегистрации распространения фронта ВУВ при инициировании светочувствительного состава ВС-2 массой ≈ 0.1 г, помещенного в латунный колпачок, получены диаграмма распространения фронта ВУВ R(t) и зависимость избыточного давления во фронте ВУВ от радиуса фронта $\Delta p(R)$. На основе метода Сахса найдены коэффициенты эмпирического уравнения, описывающего распространение фронта ВУВ при инициировании светочувствительного состава массой 1 кг при нормальных климатических условиях. Полученные данные могут использоваться в прикладных задачах, в которых требуется бесконтактное инициирование колпачков с ВС-2, входящих в конструкцию детонаторов, а также для оценки параметров ВУВ, образованной при инициировании светочувствительного состава ВС-2 произвольной массы и при произвольных параметрах окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Илюшин М. А., Целинский И. В. Лазерное инициирование высокоэнергетических соединений в науке и технике // Журн. прикл. химии. 2000. Т. 73, № 8. С. 1233–1240.
- Searcy J. Q., Fleming W., Fronabarger J. W. Preparation of 2-5-cyanotetrazolatopentaamminecobalt — CP — a new material for detonator applications // ADPA Joint Symp. on Compatibility of Plastic Materials with Explosives and Processing of Explosives, Propellants and Ingrediants Held. — Albuquerque, NM, 1979.
- 3. Bates L. R. The potential of tetrazoles in initiating explosive systems // Proc. of 13th Symp. on Explosives and Pyrotechnics. — Hilton Head Island, 1986. — Paper 12. — P. III/1–III/13.
- Ilyushin M. A., Petrova N. A., Tselinskii I. V., Chernai A. V. Laser initiation of pressed light-sensitive explosives and sheets // Hanneng Cailiao (Energ. Mater.). — 1995. — V. 3, N 1. — P. 22–25.
- Ilyushin M. A., Tselinskii I. V., Petrova N. A., Hovaiko V. I., Pavutnitsky Yu. V. Some problems of the interaction of chemically active media with pulse of laser radiation // XVIIIth Int. Conf. of Photochemistry: Book of Abstr. — Warsaw, Poland, 1997. — P. 1–83.
- Илюшин М. А., Целинский И. В., Судариков А. М. и др. Разработка компонентов высокоэнергетических композиций / под ред. И. В. Целинского. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2006.
- Илюшин М. А., Целинский И. В. Способ получения перхлората 5-гидразинотетразолртути (II): Пат. на изобрет. RU № 2 225 840 C2, (Cl 7C01 G13/00), 2004.
- Илюшин М. А., Угрюмов И. А., Долматов В. Ю., Веретенникова М. В. Инициирующий взрывчатый состав: Пат. на изобрет. RU № 2 309 139 C2, (ClC06B 43/00; C06B 45/30; C06C 7/00), 2006.
- Герасимов С. И., Кузьмин В. А. Исследование особенностей инициирования светочувствительных взрывчатых составов некогерентным излучением // XVI Харитоновские научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014.
- Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. — Изд. 2-е, испр. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.

- Герасимов С. И., Илюшин М. А., Кузьмин В. А. Возможность инициирования полимерсодержащего энергонасыщенного состава комплексного перхлората ртути лучом лазерного диода // Письма в ЖТФ. — 2015. — Т. 41, вып. 7. — С. 66–72.
- 12. Герасимов С. И., Трепалов Н. А. Теневой фоновый метод оптический метод исследования ударных волн // Журн. техн. физики. 2017. Т. 87, № 12. С. 1802–1807.
- 13. Герасимов С. И., Михайлов А. Л., Трепалов Н. А. Распространение ударной волны при взрыве взрывчатого вещества с пластичным наполнителем // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 79–86.
- Hopkinson B. British ordnance board minutes 13565 // The Nat. Arch., Kew, UK. — 1915. — C. 11.

- 15. **Cranz C.** Lehrbuch der Ballistik. Berlin: Springer Verlag, 1926.
- Sachs R. G. The dependence of blast on ambient pressure and temperature. — Army Ballist. Res. Lab. Aberdeen Proving Ground, MD, 1944. — N BRL-466.
- Dewey J. M. Expanding spherical shocks (blast waves) // Handbook of Shock Waves / G. Ben-Dor, O. Igra, E. Elperin (Eds). — Academic Press, 2001. — V. 2. — P. 441–481.
- Hargather M. J. Scaling, Characterization, and Application of Gram-range Explosive Charges to Blast Testing of Materials. — The Pennsylvania State Univ., 2008.
- Kleine H. et al. Studies of the TNT equivalence of silver azide charges // Shock Waves. — 2003. — V. 13, N 2. — P. 123–138.

Поступила в редакцию 23.05.2018. После доработки 22.11.2018. Принята к публикации 28.11.2018.