

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ВО ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ

К. Н. Панов, В. А. Комрачков, И. С. Целиков

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва
607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований методом импульсной рентгенографии процесса столкновения ударных и детонационных волн во взрывчатом веществе на основе октогена. По рентгенограммам определены характерные особенности процесса взаимодействия волн, выявлены качественные отличия процессов формирования и развития детонации во взрывчатом веществе, предварительно сжатом слабой ударной волной, и в невозмущенном взрывчатом веществе.

Ключевые слова: ударная волна, детонационная волна, ударно-волновая чувствительность, рентгенография, инициирование ВВ, возбуждение детонации, распределение плотности.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ударно-волновая чувствительность взрывчатого вещества (ВВ) уменьшается с возрастанием его начальной плотности: необходимо большее давление ударной волны для инициирования детонации [1]. Известно также, что при предварительном нагружении зарядов ВВ ударными волнами, амплитуда которых мала для инициирования детонации, происходит его десенсибилизация — уменьшение чувствительности к последующему ударно-волновому воздействию. Это явление исследовалось экспериментально при нагружении различных ВВ ударной волной (УВ) со ступенчатым профилем [2, 3], при отражении нагружающей УВ от преграды [4] и др. Нагружение образца ВВ слабой УВ изменяет не только его начальную плотность, но и внутреннюю структуру: возможны дробление, выборка пор, изменение дефектов кристаллов и их распределение по размеру и т. д.

Если ВВ до повторного нагружения успевает разгрузиться, например, за фронтом нестационарной УВ или при выходе УВ в «легкий» слой [5], то, как правило, происходит увеличение ударно-волновой чувствительности. В сохраняемых после предварительного нагружения образцах (с «поврежденной» структурой) также реализуется повышенная чувствительность к повторному нагружению [6].

В работе [7] приведены результаты рентгенографических экспериментов, в которых изучалось взаимодействие ударных и детона-

ционных волн в ВВ на основе ТАТБ. Показано, что распространение детонационной волны (ДВ) в область образца ВВ, сжатую УВ, прекращается.

Целью настоящей работы является исследование рентгенографическим методом изменения ударно-волновой чувствительности ВВ на основе октогена при взаимодействии УВ и ДВ, в частности при распространении детонации в зону образца, сжатую УВ. В экспериментах определялось распределение плотности вещества в зонах, охваченных УВ и ДВ, и в области их взаимодействия.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Опыты проводились на импульсной рентгеновской установке 2ЭРИДАН-3 с мягким спектром излучения с граничной энергией $E_{\gamma} \approx 0.75$ МэВ и длительностью импульса $\Delta t \approx 0.2$ мкс. Изображение регистрировалось на фотохромные экраны из галогенида бария, активированного европием (Digital Complex for Computer Radiography — DC-CR). Под действием ионизирующего излучения в них образуется скрытое изображение, которое может быть получено в цифровом виде с помощью специального сканирующего устройства. Технические характеристики фотохромных экранов: широкий динамический диапазон регистрации (10^4 и более); линейная переходная характеристика в большом диапазоне поглощенных доз; одноквантовая гамма-чувствительность активного вещества люминофора; пространственное

Время срабатывания датчиков и моменты рентгенографирования

Номер опыта	t_1 , мкс	t_2 , мкс	$t_1 - t_2$, мкс	t_γ , мкс	$\Delta t_1 = t_\gamma - t_1$, мкс	$\Delta t_2 = t_\gamma - t_2$, мкс	$X_{\text{фр}1}, X_{\text{фр}2}$, мм	$v_{\text{фр}1}, v_{\text{фр}2}$, км/с
1	25.64	23.80	1.84	28.60	2.96	4.80	26, 17	8.8, 3.5
2	23.16	22.76	0.40	29.42	6.26	6.66	37, 22	5.9, 3.3
3	28.37	23.78	4.59	32.48	4.11	8.7	17, 28	4.1, 3.2
4	28.42	23.81	4.61	34.90	6.48	11.09	24, 33	3.7, 3.0

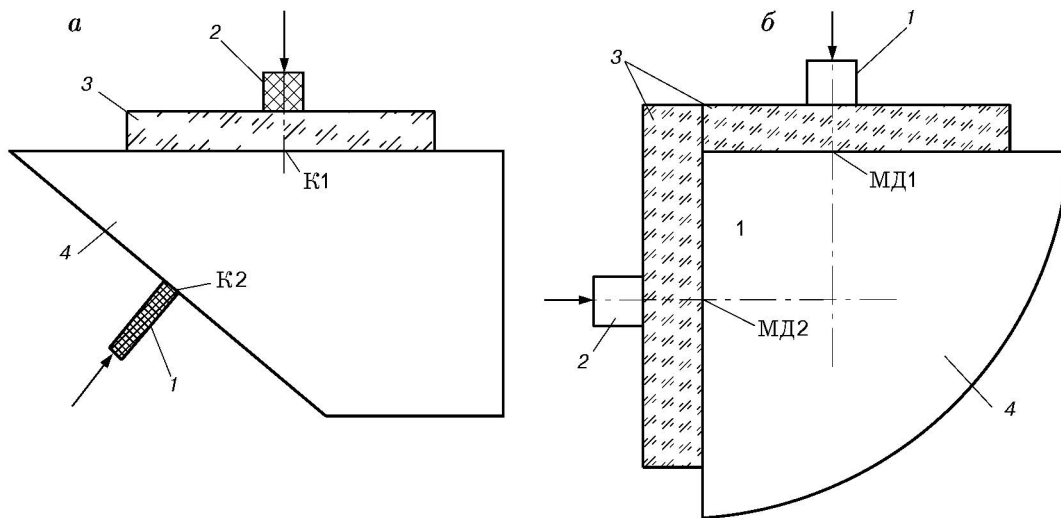


Рис. 1. Схема постановки эксперимента:

1 — инициатор № 1 (а — сечение 2 × 10 мм, б — сечение 8 × 8 мм), 2 — инициатор № 2 (сечение 8 × 8 мм), 3 — демпфер из оргстекла, 4 — исследуемый образец ВВ, К1, К2 — контактные датчики, МД1, МД2 — марганциновые датчики

разрешение ≈ 9 линий/мм или 223 dpi. Использование таких экранов позволяет разрешать объекты с разностью оптической толщины $\approx 0.02 \div 0.05$ г/см².

На рис. 1 представлена схема экспериментальных блоков. Система нагружения, используемая в опытах, описана в работах [7, 8]. Иницирование исследуемого образца ВВ проводилось с помощью двух протяженных зарядов-инициаторов из ВВ на основе тэна через демпфер из оргстекла или без него. Давление инициирующей УВ варьировалось за счет изменения толщины демпфирующего слоя. Инициаторы срабатывали в разное время, что позволяло сталкивать фронты УВ и ДВ на разных стадиях процесса. Точное время нагружения ВВ под каждым из инициаторов определялось по моментам срабатывания контактных или марганциновых датчиков, которые располагались между демпфером и исследуемым зарядом.

Исследуемый заряд представлял собой

пашку толщиной в направлении рентгенографирования 60 мм. Начальная плотность образцов ВВ во всех опытах составляет 1.883 г/см³. Для определения распределения плотности вещества применялся метод, описанный в работе [9]. Суть метода заключается в определении распределения плотности вещества за фронтом волны по формуле $\rho(x, y) = \frac{Z(x, y)}{L_0}$, где Z — оптическая толщина, L_0 — начальный размер образца в направлении рентгенографирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В первом эксперименте (см. рис. 1, а) исследовалось взаимодействие цилиндрической ДВ, распространяющейся с поверхности ВВ, с УВ, которая не переходит в детонацию (опыт № 1). В трех последующих опытах исследовалось взаимодействие УВ, которая не переходит в детонацию, с переходящей в детонацию удар-

ной волной на разных стадиях ее формирования.

В таблице приведены время входа УВ в ВВ под инициаторами (t_1, t_2) и время рентгенографирования (t_γ). По положению фронта волны $X_{\text{фр}}$, измеренного по рентгенограмме, оценена средняя скорость фронта волны в ВВ для каждого инициатора — $v_{\text{фр}i} = X_{\text{фр}i}/\Delta t_i$.

В опыте № 1 для инициирования ДВ в образце ВВ использовался инициатор в виде пластины из ВВ на основе тэна сечением 2×10 мм (инициатор 1). Для формирования УВ применялся протяженный заряд-инициатор из ВВ на основе тэна сечением 8×8 мм, который нагружал образец ВВ через демпфер из оргстекла (инициатор 2). Толщина демпфера в опыте № 1 составляла 10 мм. При этом в ВВ формируется УВ с незначительным разложением вещества за фронтом, которая не переходит в детонацию.

Рентгенографирование сборки проводилось после взаимодействия УВ и ДВ. На рис. 2 приведен рентгеноснимок взрывного процесса с обозначением направлений, вдоль которых определялось распределение плотности $\rho(X)$. Видно, что фронт ДВ проходит в область вещества, сжатого УВ, без искажения своей формы, т. е. детонация не прерывается на ВВ, сжатом УВ.

На рис. 3 приведены распределения плотности по направлениям, указанным на рис. 2. Координата $X = 0$ во всех зависимостях соответствует поверхности нагружения ВВ. Плотность вещества за фронтом УВ составляет ≈ 2.1 г/см³ и на расстоянии ≈ 8 мм за фронтом практически не меняется. После этого плотность резко снижается, что связано с разложением ВВ.

Выше отмечалось, что видимых искажений формы фронтов УВ и ДВ в момент рентгенографирования нет, но амплитуда и профиль плотности в зоне взаимодействия волн отличаются как от детонационного, так и от ударного профиля. Плотность в зоне взаимодействия волн несколько выше, чем за фронтом ДВ, распространяющейся по невозмущенному ВВ.

В опытах № 2–4 (см. рис. 1, б) сталкивались УВ, которая переходит в детонацию на некоторой глубине (инициатор 1), и УВ, которая не переходит в детонацию (инициатор 2). Толщина демпфера под инициатором 1 составляла 8.5 мм, под инициатором 2 — 10 мм. В первом случае получен переход УВ в детона-

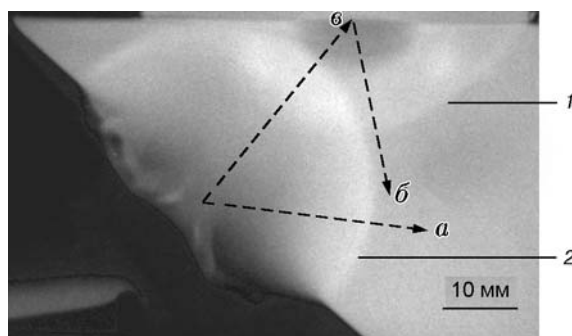


Рис. 2. Взаимодействие УВ и ДВ (опыт № 1): 1 — фронт УВ, 2 — фронт ДВ, $a, б, в$ — направления, по которым определялись зависимости $\rho(X)$

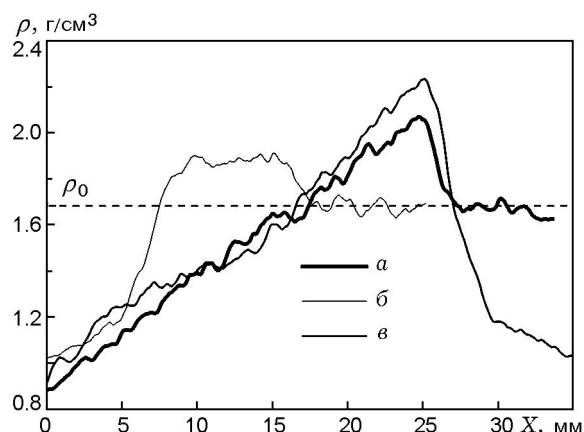


Рис. 3. Профили плотности в опыте № 1 по направлениям, указанным на рис. 2

цию на глубине ≈ 12 мм; во втором случае УВ не переходит в детонацию. Время срабатывания инициаторов ($t_1 - t_2$) варьировалось в опытах так, чтобы УВ на разных стадиях процесса возбуждения детонации встречала на своем пути сжатое ударной волной ВВ.

Амплитуда нагружающего давления на фронте УВ, измеренная манганиновыми датчиками, при толщине демпфера 8.5 мм составляла ≈ 4.1 ГПа, при толщине демпфера 10 мм — ≈ 3.2 ГПа.

На рис. 4 приведен рентгеноснимок взрывного процесса в опыте № 2. Видно, что в момент рентгенографирования под инициатором 1 произошло возбуждение детонации. Форма фронта ДВ указывает на то, что произошло это на некоторой глубине из небольшой области вблизи плоскости нагружения. Переход УВ в ДВ успел завершиться до взаимодействия с фронтом УВ от инициатора 2. Фронт ДВ рас-

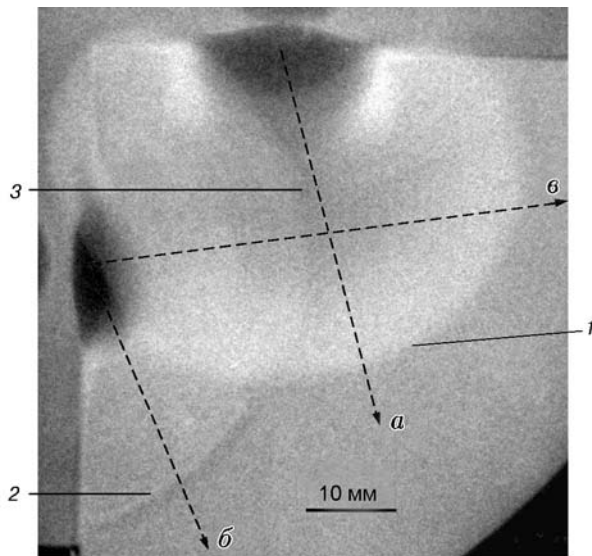


Рис. 4. Взаимодействие УВ с переходящей в детонацию УВ (опыт № 2):

1 — фронт ДВ, 2 — фронт УВ, 3 — фронт УВ в продуктах взрыва, $a \div b$ — направления, по которым определялись зависимости $\rho(X)$

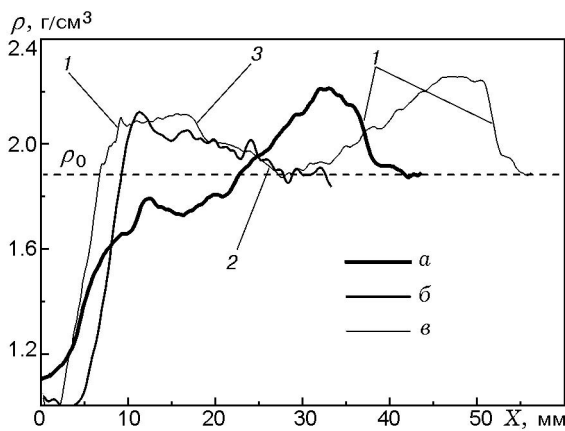


Рис. 5. Профили плотности в опыте № 2 по направлениям, указанным на рис. 4:

1 — фронт ДВ, 2 — фронт УВ, 3 — положения контактной границы (место столкновения фронтов)

пространяется в сжатую область без искажения. Схожая картина зафиксирована и в опыте № 1. Результаты опытов № 1 и № 2 показывают, что если ДВ успела сформироваться, то расположенная на ее пути область сжатого ВВ не вызывает срыва детонации, как это было зафиксировано для ВВ на основе ТАТБ [7].

Фронт УВ от инициатора 2, входя в область продуктов взрыва, изменяет свою форму. В зоне продуктов он прошел большее рас-

стояние, чем в невозмущенной области ВВ (см. рис. 4). На рис. 5 приведены распределения плотности по направлениям, указанным на рис. 4. Полученные зависимости наглядно демонстрируют, как меняется плотность при взаимодействии УВ и ДВ по сравнению с распределением плотности за фронтом УВ и ДВ, распространяющихся по невозмущенному ВВ. Кроме этого, на зависимости $\rho(X)$ для направления « v » хорошо видны характерные границы в зоне взаимодействия волн.

На рис. 6 представлен снимок взрывного процесса в опыте № 3. В отличие от опыта № 2, УВ от инициатора 2 входила в ВВ на ≈ 4.6 мкс раньше, чем УВ от инициатора 1. При скорости фронта ≈ 3 км/с ударная волна проходит на ≈ 14 мм дальше, чем в опыте № 2. УВ, инициирующая детонацию, до перехода в ДВ встретит на своем пути вещество, сжатое до плотности ≈ 2.1 г/см³. При взаимодействии волн изменяются параметры течения за фронтом УВ, которая в невозмущенном ВВ переходит в детонацию. В этих условиях возбуждение детонации может и не произойти.

Рентгенографирование сборки проводилось на 2.15 мкс раньше, чем в опыте № 2 (если считать от момента срабатывания датчика t_1). При этом предполагалось, что если предварительное нагружение УВ не влияет на процесс возбуждения детонации, то на снимке должна быть зафиксирована ДВ под инициатором 1. Из рис. 6 видно, что детонация не возникла. В области, где произошло столкновение фронтов УВ, на рентгенограмме зафиксирована вытянутая зона с большей степенью почернения, чем в области сжатого за фронтом вещества. Это может свидетельствовать о разложении ВВ в месте столкновения фронтов УВ.

На рис. 7 приведены распределения плотности по направлениям, указанным на рис. 6. Плотность за фронтом УВ под инициатором 2 на расстоянии ≈ 20 мм практически не изменяется и составляет ≈ 2.0 г/см³. Профили плотности за фронтом УВ под инициатором 1 в невозмущенной зоне « a » и в зоне взаимодействия « v » близки между собой. Плотность вещества за фронтом достигает ≈ 2.3 г/см³, в месте столкновения фронтов УВ — ≈ 2.0 г/см³.

В опыте № 4 рентгенографирование проводилось в более позднее время, чтобы показать, что детонация действительно не возникла. Кроме того, интересно проследить, как будет изменяться со временем зона разложе-

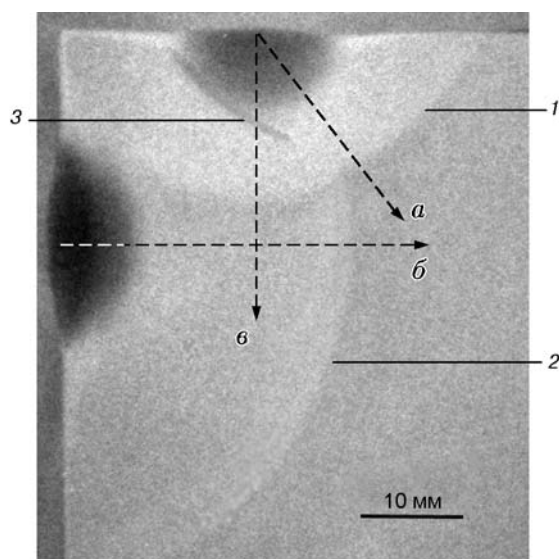


Рис. 6. Взаимодействие УВ с переходящей в детонацию УВ (опыт № 3):

1 — фронт УВ, переходящей в детонацию в невозмущенном ВВ, 2 — фронт УВ, 3 — разложение в зоне взаимодействия фронтов УВ, a и b — направления, по которым определялись зависимости $\rho(X)$

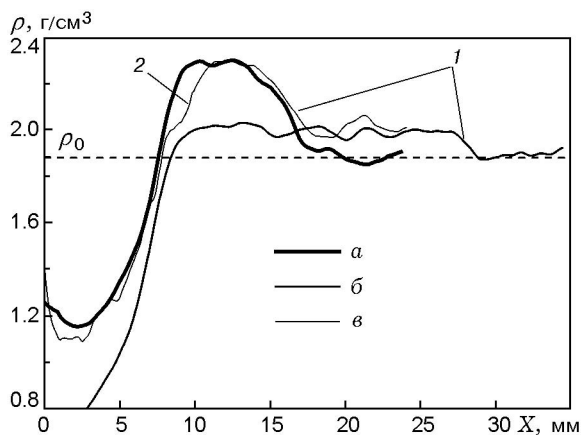


Рис. 7. Профили плотности в опыте № 3 по направлениям, указанным на рис. 6:

1 — фронт УВ, 2 — зона разложения ВВ при взаимодействии УВ

ния, которая образовалась в месте столкновения фронтов УВ.

На рис. 8 представлен снимок взрывного процесса в опыте № 4. Рентгенографирование сборки проводилось на ≈ 2.4 мкс позже, чем в опыте № 3, и на ≈ 0.2 мкс позже, чем в опыте № 2. Из рис. 8 видно, что детонация, как и в опыте № 3, не возникла. Таким образом, дополнительное сжатие вещества на более ранней стадии перехода в детонацию приводит к

ее срыву (сравните рис. 4 и рис. 8). Как и в опыте № 3, зафиксирована зона разложения ВВ в месте столкновения фронтов, которая образовалась на том же месте. На рис. 9 приведены распределения плотности по направлениям, указанным на рис. 8. Полученные зависимости хорошо согласуются с данными, полученными в опыте № 3. Плотность вещества в зоне столкновения фронтов УВ снизилась и составляет ≈ 1.6 г/см³.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из представленных распределений плотности видно, что плотность продуктов взрыва за фронтом цилиндрической ДВ (см. рис. 3) составляет ≈ 2.3 г/см³. Оценка плотности в точке Жуге в приближении кубического уравнения состояния продуктов взрыва дает значение $\rho_{ж} = (4/3)\rho_0 = 2.5$ г/см³. Занижение экспериментального значения плотности происходит из-за размытия фронта ДВ. Толщина размытия ΔX зависит от нескольких факторов. Ее можно оценить, зная скорость фронта ДВ $D \approx 8.8$ км/с и длительность рентгеновского импульса $\Delta t \approx 0.2$ мкс. Перемножив эти два значения, получим величину размытия $\Delta X \approx 1.8$ мм. Экспериментальное значение размытия фронта ДВ составляет $\Delta X \approx 3$ мм. Это свидетельствует о том, что на расстоянии менее $\Delta X/2 = 1.5$ мм от фронта ДВ измерения плотности невозможны. Экстраполяция экспериментального распределения плотности продуктов взрыва $\rho(X)$ на фронт затруднительна, так как снижение плотности продуктов за фронтом расходящейся цилиндрической ДВ имеет нелинейный характер и происходит очень быстро.

При распространении УВ в ВВ со скоростью ≈ 3 км/с размытие фронта меньше и составляет по экспериментальным профилям плотности $\Delta X \approx 1.8$ мм. Таким образом, измерения плотности невозможны на расстоянии менее ≈ 1 мм от фронта УВ.

Плотность вещества за фронтом определяется как отношение оптической толщины Z к начальной толщине образца ВВ L_0 в направлении рентгенографирования. При наличии боковой разгрузки с поверхностей, перпендикулярных направлению рентгенографирования, расчет по предлагаемой формуле приводит к погрешности. Чем дальше от фронта, тем большая часть вещества вдоль луча подвержена

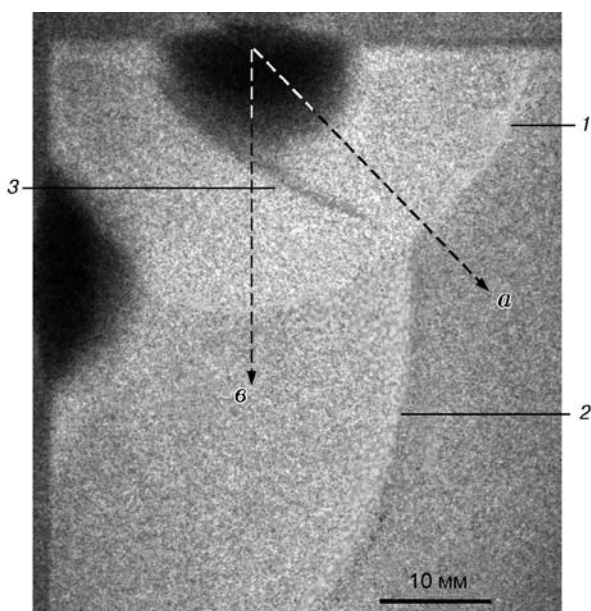


Рис. 8. Взаимодействие УВ с переходящей в детонацию УВ (опыт № 4):

1 — фронт УВ, переходящей в детонацию в невозмущенном ВВ, 2 — фронт УВ, 3 — разложение в зоне взаимодействия фронтов УВ, *a*, *b* — направления, по которым определялись зависимости $\rho(X)$

влиянию разгрузки. Вследствие этого погрешность носит систематический характер и зависит как от расстояния за фронтом, так и от расстояния фронта относительно нагружаемой поверхности. Непосредственно за фронтом вычисления дают заниженные значения плотности: погрешность отрицательная и не превышает $\approx 2 \div 3$ %. На половине расстояния, которое прошел фронт, погрешность становится близкой к нулю, а затем положительной (завышение плотности). Погрешность максимальна вблизи нагружаемой поверхности и для нашего случая не превышает ≈ 10 %.

Необходимо также учесть погрешность определения оптической толщины Z . По своей природе эта погрешность случайная и в пересчете на плотность не превышает $\approx 2 \div 3$ %.

Распределения плотности позволяют получить количественные данные о состоянии вещества в зоне взаимодействия фронтов УВ и ДВ. Сравнивая зависимости $\rho(X)$ в области взаимодействия и за фронтами волн, распространяющихся по невозмущенному ВВ, можно более достоверно анализировать процессы внутри ВВ.

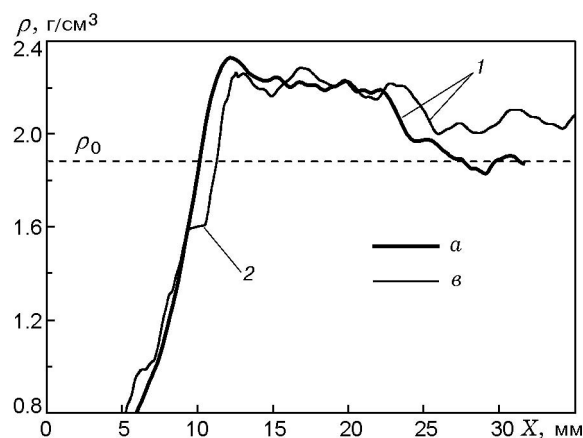


Рис. 9. Профили плотности в опыте № 4 по направлениям, указанным на рис. 8:

1 — фронт УВ, 2 — зона разложения ВВ при взаимодействии УВ

Экспериментально показано, что переход УВ в детонацию в ВВ на основе октогена, реализующийся в обычных условиях, не происходит при предварительном поджатии зоны формирования ДВ слабой ударной волной до плотности ≈ 2.1 г/см³. Зависимость ударно-волновой чувствительности от начальной плотности ВВ известна давно. Однако в описанных экспериментах нельзя точно сказать, что только предварительное сжатие зоны формирования ДВ явилось причиной того, что детонация не инициируется. Во-первых, за фронтом слабой УВ происходит не только уплотнение вещества, но и изменение внутренней структуры исходного ВВ. Во-вторых, после столкновения расходящихся УВ реализуется сложное течение вещества из-за того, что вектор массовой скорости за фронтами сталкивающихся в разных точках УВ имеет разные направления. В-третьих, экспериментально зафиксировано уменьшение плотности в месте столкновения фронтов УВ, что может свидетельствовать о разложении ВВ. Зона пониженной плотности располагается между областью с продуктами разложения ВВ (темная на рентгено снимках) и фронтом УВ, которая инициирует детонацию. Это может привести к тому, что фронт УВ лишится той необходимой подпитки энергии из зоны разложения ВВ, которая требуется для перехода ее в детонацию.

Какой из трех перечисленных выше факторов преобладает в изменении ударно-волновой чувствительности, сказать сложно. В работе [7], в которой проводились аналогичные

опыты с ВВ на основе ТАТБ, показано, что сжатие ВВ ударной волной препятствует распространению сформировавшейся детонации в сжатую область. Во взрывчатом веществе на основе октогена такого эффекта нет, фронт ДВ проходит в сжатую область практически без искажения (см. опыт № 1).

Одно из возможных объяснений этого явления состоит в известной зависимости ударно-волновой чувствительности от плотности. Для ВВ на основе ТАТБ эта зависимость в диапазоне начальной плотности $1.89 \div 1.91 \text{ г/см}^3$ очень сильная [1]. При этом если за фронтом УВ вещество сжимается до плотности $\approx 2 \text{ г/см}^3$, то давление, которое необходимо для его инициирования, превышает давление в точке Жуге для пластифицированного ТАТБ. Таким образом, детонация не может распространяться в сжатую область.

В пластифицированном октогене нет такой сильной зависимости ударно-волновой чувствительности от плотности и, кроме того, давление в точке Жуге намного выше, чем в ВВ на основе ТАТБ ($p_{ж} \approx 40 \text{ ГПа}$ и $\approx 29 \text{ ГПа}$ соответственно) [10]. Это, по-видимому, приводит к тому, что детонация в пластифицированном октогене проходит в область, сжатую УВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены экспериментальные результаты, полученные при исследовании столкновений ударных и детонационных волн в ВВ на основе октогена. По рентгенограмкам выявлены качественные отличия процессов формирования и развития детонации в предварительно сжатом слабой ударной волной ВВ и в невозмущенном ВВ.

1. Распространение детонационной волны в область ВВ, сжатую ударной волной до плотности $\approx 2.1 \text{ г/см}^3$, продолжается без искажения формы фронта и изменения его скорости.

2. Плотность вещества за фронтом детонационной волны, распространяющейся по сжатому ударной волной ВВ, выше, чем за фронтом детонационной волны в области невозмущенного ВВ.

3. Переход ударной волны в детонацию, реализующийся при ее развитии в обычных условиях, не происходит при предварительном сжатии зоны формирования детонационной волны слабой ударной волной до плотности $\approx 2.1 \text{ г/см}^3$.

4. Экспериментально зарегистрировано уменьшение плотности вещества в узкой зоне столкновения фронтов ударных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов Ю. А., Косолапов В. Б., Фомичева Л. В., Хабаров И. П. Влияние температуры, плотности и технологических факторов на ударно-волновую чувствительность пластифицированного ТАТБ // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 110–112.
2. Dienes J. K., Kershner J. D. Multiple-shock initiation via statistical crack mechanics // 12th Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California.
3. Salisbury D. A., Taylor P., Winter R. E., et al. Single and double shock initiation of edc37 // Ibid.
4. Winter R. E., Taylor P., Salisbury D. A. Reaction of HMX-based explosive caused by regular reflection of shocks // 11th Intern. Detonation Symp., August 31 – September 4, 1998, Colorado.
5. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е. и др. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности гетерогенного ВВ на основе ТАТБ с учетом одно- и двукратного нагружения, в том числе с промежуточной разгрузкой // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 2–3. С. 32–39.
6. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. Эффект увеличения ударно-волновой чувствительности поврежденных образцов ТАТБ // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 4. С. 92–97.
7. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Ольхов В. О. и др. Расчетное моделирование с опорой на эксперименты инициирования и развития детонации ВВ на основе ТАТБ с учетом десенсибилизации при взаимодействии ударной и детонационной волн. Саров, 1995. С. 37–95. (Препр. / РФЯЦ-ВНИИЭФ).
8. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. Применение импульсной рентгенографии для исследования ударно-волнового инициирования ТАТБ // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 96–101.
9. Панов К. Н., Комрачков В. А. Исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся ударной волны во взрывчатом веществе // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 5. С. 102–108.
10. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

Поступила в редакцию 13/IX 2005 г.,
в окончательном варианте — 7/VII 2006 г.