

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

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

Предложена схема проведения эксперимента, позволяющая в одном опыте одновременно определять зависимости давления и плотности от времени. По полученным зависимостям можно проследить изменение фазового состояния вещества за ударным фронтом в координатах давление — объем и рассчитать изменение степени разложения взрывчатого вещества во времени после прохождения фронта ударной волны. Для взрывчатого состава на основе флегматизированного октогена получены зависимости формальной кинетики разложения за фронтом ударной волны.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, косая ударная волна, детонация, рентгенография, инициирование ВВ, распределение плотности, формальная кинетика.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при математическом моделировании процессов инициирования взрывчатых веществ (ВВ) широкое использование получили формально-кинетические модели, в которых из физических соображений задается функциональная связь между параметрами, характеризующими процесс химического разложения ВВ, а экспериментальные данные используются для определения коэффициентов в соответствующих зависимостях (см., например, [1, 2]). При этом процесс разложения ВВ характеризуется одной переменной  $\alpha$ , которая определяется как отношение массы прореагировавшего вещества к общей массе исходного ВВ.

В работах [3, 4] описан расчетно-экспериментальный метод определения зависимости скорости превращения исходного ВВ в продукты взрыва  $\frac{d\alpha}{dt}$  за фронтом ударной волны (УВ). Вначале методом манганинового датчика определяют зависимость давления  $p$  от времени  $t$  либо электромагнитным методом в разных сечениях образца ВВ определяют зависимость скорости  $u$  от времени. Далее по полученным зависимостям  $p(t)$  или  $u(t)$  рассчитывают зависимость удельного объема от времени  $V(t)$ . Затем в координатах  $p$ – $V$  строятся фазовые диаграммы состояния частиц вещества за фронтом УВ. Каждой точке на фазовой диаграмме соответствует определенный момент времени после ударного сжатия. В предположе-

нии аддитивности удельных объемов и энергий исходного ВВ и продуктов его разложения каждой точке траектории изменения состояния приводится в соответствие определенная концентрация продуктов взрыва. Таким образом, для каждой выделенной частицы определяется закон изменения глубины разложения вещества со временем  $\alpha(t)$ . Авторы такого подхода отмечают, что расчет зависимости  $V(t)$  связан с большими трудностями и может приводить в неблагоприятных случаях к большой погрешности (до  $\approx 60\%$ ).

В работе [5] для определения кинетики разложения ВВ использовался метод квазитонких слоев. Тонкий слой ВВ помещался между двумя экранами из эталонных сред. С обратной стороны нагружения на границе ВВ — экран располагался датчик давления, который регистрировал зависимость  $p(t)$ . Зависимость  $V(t)$  определялась расчетным путем по изменению толщины квазитонкого слоя. Дальнейший расчет зависимости  $\alpha(t)$  проводился так же, как в работах [3, 4].

Уменьшить погрешность определения  $\alpha$  можно путем одновременного измерения зависимостей  $V(t)$  и  $p(t)$  непосредственно в эксперименте. В настоящее время в литературе появилось много работ, посвященных исследованию состояния вещества за фронтом ударной (детонационной) волны с использованием излучений разного вида [6–8]. Главным образом, в этих работах уделялось внимание проблеме определения плотности вещества за фронтом детона-

ционной волны или инициирующей УВ.

Целью настоящего исследования является разработка экспериментального метода определения закономерности разложения ВВ за фронтом УВ по зависимостям  $p(t)$  и  $V(t)$ , полученным в одном опыте.

## ПОСТАНОВКА ОПЫТА

На рис. 1 представлена схема постановки опытов, позволяющая регистрировать изменение плотности вещества за фронтом УВ  $\rho(t)$ , а также зависимость  $p(t)$  на разной глубине  $h$  от нагружаемой поверхности В. Для этого образец ВВ нагружался криволинейной УВ от скользящей детонации слоя пластического ВВ. Слой пластического ВВ, расположенный на демпфере, инициировался по линии, перпендикулярной плоскости чертежа, линейным генератором детонационной волны. Для снижения амплитуды УВ, входящей в исследуемое ВВ, использовался демпфер из алюминиевого сплава.

Исследовался образец из взрывчатого состава на основе флегматизированного октогена начальной плотностью  $\rho_0 = 1.89 \text{ г/см}^3$ . Исследуемый заряд представлял собой шашку толщиной в направлении рентгенографирования 60 мм, которая срезалась под определенным углом. Угол подбирался таким, чтобы фронт УВ выходил одновременно на плоскость среза. На эту плоскость устанавливалась шашка диаметром 90 мм и толщиной 15 мм из того же взрывчатого состава, которая служила «оптическим» клином (см. рис. 1). Для определения распределения плотности вещества применялся метод, описанный в работе [8]. Суть

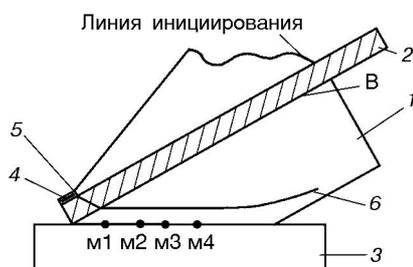


Рис. 1. Схематический вид экспериментальной сборки на момент рентгенографирования: 1 — образец, 2 — демпфер, 3 — «оптический» клин, 4 — слой пластического ВВ, 5 — фронт ДВ в пластическом ВВ, 6 — фронт УВ в исследуемом образце

метода заключается в определении распределения плотности вещества за фронтом волны по формуле  $\bar{\rho}(x) \frac{Z(x)}{L_0}$ , где  $Z$  — оптическая толщина,  $L_0$  — начальный размер образца в направлении рентгенографирования. Погрешность определения плотности по упрощенной формуле не превышала  $\approx 5 \div 7 \%$ .

Для определения профиля давления  $p(t)$  использовались манганиновые датчики (m1 ÷ m4), чувствительный элемент которых представлял собой полоску манганиновой фольги размером  $8 \times 0.3$  мм, толщиной 0.03 мм. В опыте активный элемент датчика размещался вдоль линии инициирования. Погрешность определения давления составляла  $\approx 10 \%$ .

Манганиновые датчики (m1 ÷ m4) устанавливались между исследуемым образцом и «оптическим» клином. Датчики фиксировали зависимость  $p(t)$  при  $h = 3, 7, 9, 12$  мм (см. схему на рис. 2). Значение нагружающего давления оценивалось расчетным путем и при толщине демпфера 9.6 мм составляло 2.5 ГПа.

Рентгенографирование сборки проводилось на  $\approx 1$  мкс раньше прихода фронта УВ на манганиновые датчики. При этом предполагалось, что состояние вещества за фронтом в момент рентгенографирования и в момент регистрации давления одинаково.

Опыты выполнялись на импульсной рентгеновской установке «Игрек» с мягким спектром излучения с граничной энергией  $E_\gamma \approx 0.8$  МэВ и длительностью  $\Delta t \approx 0.03$  мкс. Изображение регистрировалось на пакет фотохромных экранов из галогенида бария, активированного европием (Digital Complex for Computer Radiography — DC-CR), расположенных друг за другом. Итоговое рентгеновское изображение получалось путем суммирования 10 изображений по специально раз-

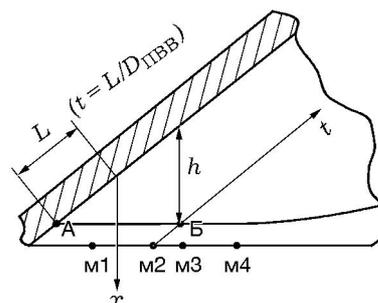


Рис. 2. Схема обчета рентгенограммы

работанному алгоритму [9]. Технические характеристики фотохромных экранов: динамический диапазон регистрации  $\geq 10^4$ ; линейная переходная характеристика в большом диапазоне поглощенных доз; одноквантовая гамма-чувствительность активного вещества люминофора; пространственное разрешение  $\approx 9$  линий/мм или 223 dpi. Использование таких экранов позволяет разрешать объекты с разностью оптической толщины  $\approx 0.02 \div 0.05$  г/см<sup>2</sup>.

На рис. 2 представлена схема расчета  $\rho(t)$  по рентгеновскому изображению. Профиль плотности  $\rho(x)$  строили вдоль направления  $x$ , перпендикулярного к фронту УВ, на определенном расстоянии  $L$  от начала нагружения (точка А). Значение  $x = 0$  соответствует нагружаемой поверхности ВВ. Каждый профиль плотности  $\rho(x)$  соответствует определенному моменту времени  $t = L/D_{\text{ПВВ}}$ , где  $D_{\text{ПВВ}}$  — скорость детонации пластического ВВ.

Таким образом, получен набор распределений плотности вещества, каждое из которых соответствует определенному моменту времени, отсчитываемому от начала нагружения (от положения ударного фронта рис. 1, поз. 6). Значения плотностей из полученных распределений, соответствующие одной глубине  $h$  от нагружаемой поверхности, определяют изменение плотности во времени на этой глубине  $\rho(t)$ . Другими словами, зависимость  $\rho(t)$  получается из профиля плотности, полученного по рентгеновскому изображению параллельно нагружаемой поверхности при  $h = \text{const}$ . В этом случае значение  $t = 0$  совпадает с положением фронта УВ (момент нагружения ВВ в точке Б).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА

На рис. 3 представлена рентгенограмма взрывного процесса. Фронт УВ движется перпендикулярно границе «исследуемый образец — «оптический» клин», на которой устанавливались манганиновые датчики. Угол наклона фронта к нагружаемой поверхности соответствует скорости распространения фронта  $\approx 3.5$  км/с. Скорость фронта стационарной детонации исследуемого ВВ составляет 8.8 км/с. Из этого следует, что на момент рентгенографирования детонация не возникла. За фронтом УВ хорошо видна структура нагруженного вещества, а именно видна волна уплотнения, которая догоняет фронт УВ. Вблизи нагружаемой поверхности зафиксирована область пони-

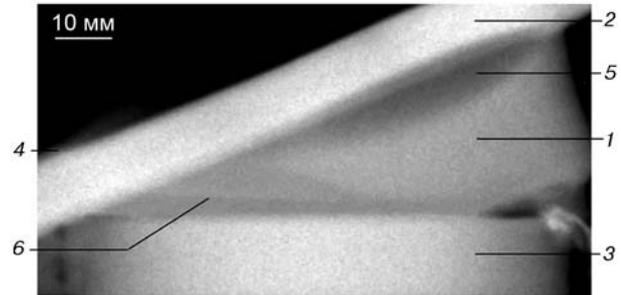


Рис. 3. Рентгенограмма взрывного процесса:  
1 — образец взрывчатого состава, 2 — демпфер, 3 — «оптический» клин, 4 — слой пластического ВВ, 5 — область с пониженной плотностью, 6 — фронт УВ

женной плотности, которая связана с разлетом продуктов разложения.

На рис. 4 представлены распределения плотности за фронтом УВ в различные моменты времени. В момент времени  $t = 1.2$  мкс плотность вещества за фронтом достигает  $\approx 2.03$  г/см<sup>3</sup>. При  $t = 3.6$  мкс профиль плотности имеет двухступенчатый вид и связан с волной сжатия за фронтом. Плотность вещества непосредственно за фронтом составляет  $\approx 2.04$  г/см<sup>3</sup>. На расстоянии  $\approx 3$  мм от фронта плотность вещества увеличивается до  $\approx 2.1$  г/см<sup>3</sup>, затем снижается. Двухступенчатый характер профиля плотности сохраняется до момента  $t = 5.2$  мкс.

На рис. 5 представлены зависимости  $\rho(t)$  на различной глубине  $h$ , где устанавливались датчики давления.

При  $h = 3$  мм через  $\approx 3.7$  мкс после прохождения фронта плотность вещества резко падает (темная область на рентгенограмме рис. 3). При  $h = 6$  мм через  $\approx 1.5$  мкс после прохождения фронта плотность вещества растет (плотность за фронтом больше, чем на фронте) до значения 2.2 г/см<sup>3</sup>, а затем через  $\approx 3$  мкс вновь падает. Для  $h = 12$  мм рост плотности происходит непосредственно за фронтом УВ. То есть можно говорить о волне сжатия, которая распространяется по уплотненному ударной волной веществу и догоняет фронт.

На рис. 6 приведены профили давления, зарегистрированные манганиновыми датчиками, и зависимости  $V/V_0(t)$  на глубине расположения датчиков давления. Значение  $t = 0$  соответствует фронту УВ.

Повышение давления за фронтом УВ в ВВ

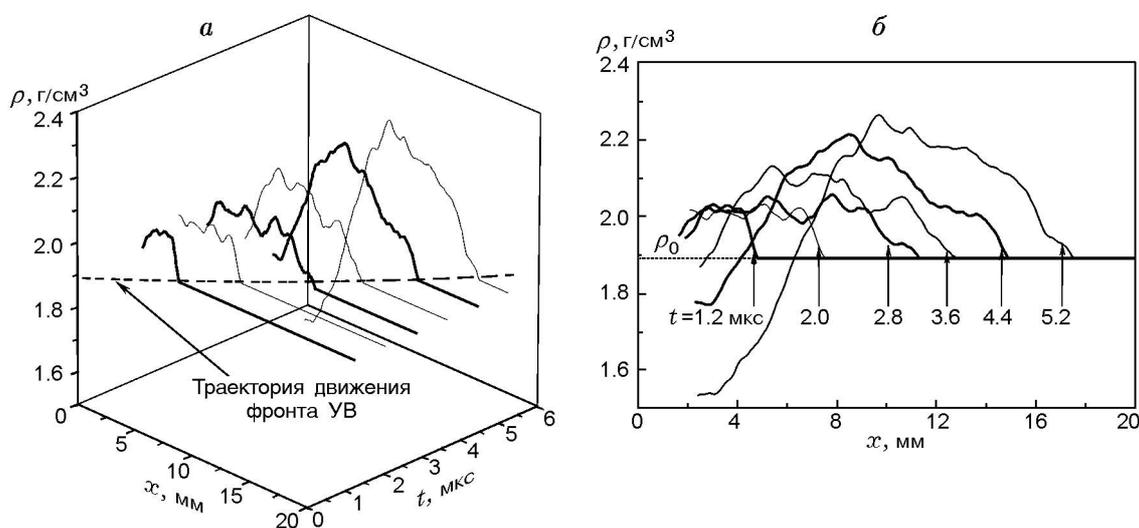
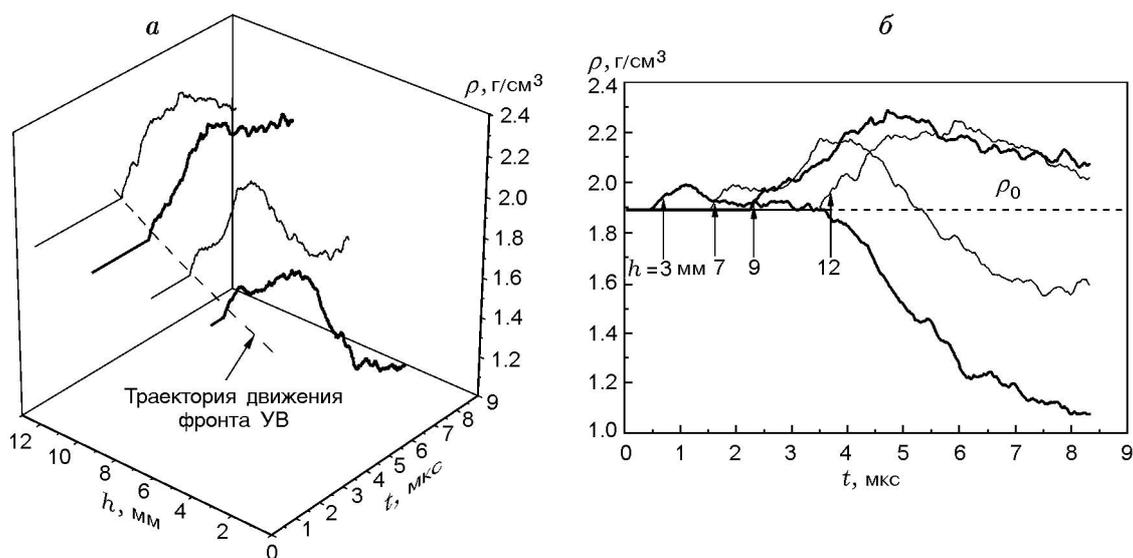


Рис. 4. Эволюция профиля плотности за фронтом УВ

Рис. 5. Зависимости  $\rho(t)$  на различной глубине от нагружаемой поверхности

свидетельствует о реакции взрывчатого разложения. Расстояние от фронта до начала интенсивного роста давления уменьшается с увеличением расстояния от поверхности нагружения. Кроме этого, скорость нарастания давления за фронтом увеличивается в каждом последующем сечении ВВ. Такая картина развития взрывчатого превращения фиксировалась неоднократно многими исследователями [10, 3].

По данным рис. 6 строилась зависимость  $p(V/V_0)$ , которая наносилась на  $p$ - $V$ -диаграмму для исследуемого взрывчатого со-

става. Адиабата «холодного» взрывчатого состава ( $H$ ) использовалась в форме Ми — Грюнайзена, изоэнтропа продукта взрыва ( $S$ ) проведена из точки Чемпена — Жуге в форме, предложенной В. Н. Зубаревым [11]. Из рис. 7 видно, что некоторое время после ударного сжатия экспериментальные точки на  $p$ - $V$ -зависимости лежат на ударной адиабате «холодного» взрывчатого состава. Это говорит о том, что в этом интервале времени выделение энергии за счет реакции разложения незначительно. После этого экспериментальные точки

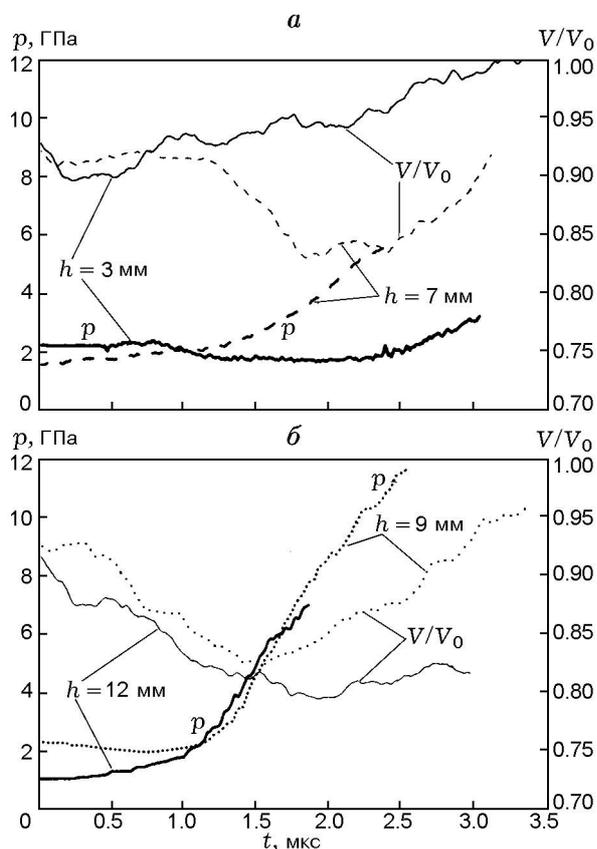


Рис. 6. Профили давления и зависимости  $V/V_0(t)$  при различных значениях  $h$

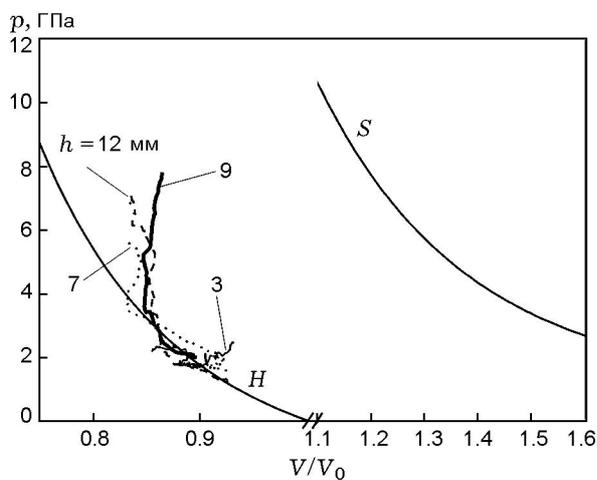


Рис. 7.  $p$ - $V$ -диаграмма

отклоняются от адиабаты «холодного» взрывчатого состава, т. е. происходит разложение вещества с выделением энергии.

По данным рис. 7 можно получить зависимость доли выгоревшего вещества от времени  $\alpha(t)$ . При этом, как и в работах [1, 2], предполагается, что за фронтом УВ давления смеси, взрывчатого состава (ВС) и продуктов взрыва (ПВ) равны между собой:  $p_{см} = p_{ВС} = p_{ПВ}$ , а удельные объемы складываются аддитивно:  $V_{см} = \alpha V_{ВС} + (1 - \alpha)V_{ПВ}$ .

На рис. 8 представлены результаты расчета зависимостей  $\alpha(t)$ . Полученные зависимости коррелируют с зависимостями  $p(t)$  на рис. 6. Для составов ТНТ [3] и RX-26-AF [4] профили  $\alpha(t)$  качественно подобны.

Полученные зависимости показывают, что чем больше расстояние, которое проходит УВ от нагружаемой поверхности, тем раньше за фронтом начинает расти значение  $\alpha$ . Это говорит о том, что на начальном этапе интенсивное разложение вещества происходит далеко за фронтом. По мере распространения УВ волна химической реакции начинает догонять фронт УВ.

По данным рис. 8 можно построить кинетические кривые  $\frac{d\alpha}{dt}(\alpha)$  при разных значениях  $h$ . Полученные зависимости, представленные на рис. 9, качественно согласуются с данными, полученными методом квазитонких слоев [5].

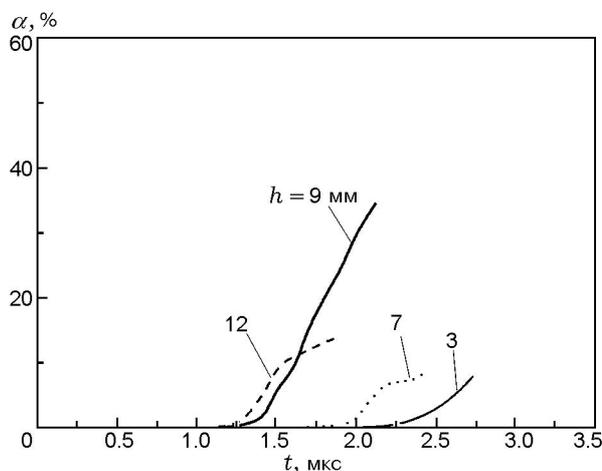


Рис. 8. Зависимости  $\alpha(t)$  при различных значениях  $h$

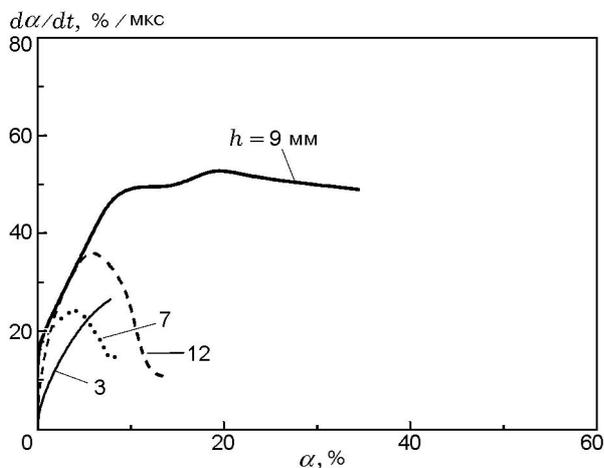


Рис. 9. Зависимости  $\frac{d\alpha}{dt}(\alpha)$  при различных значениях  $h$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных результатов позволил выявить закономерности развития взрывчатого превращения за фронтом УВ, которые, по мнению авторов, являются общими при ударно-волновом нагружении гетерогенных ВВ. На рентгено снимке за фронтом УВ зафиксирована волна уплотнения, которая догоняет УВ. Постановка экспериментов позволяет непосредственно по рентгено снимкам построить  $h-t$ -диаграмму (рис. 10) границ характерных зон в образце при ударно-волновом нагружении.

При ударно-волновом нагружении ВВ через некоторое время (в данном случае  $\approx 3$  мкс)

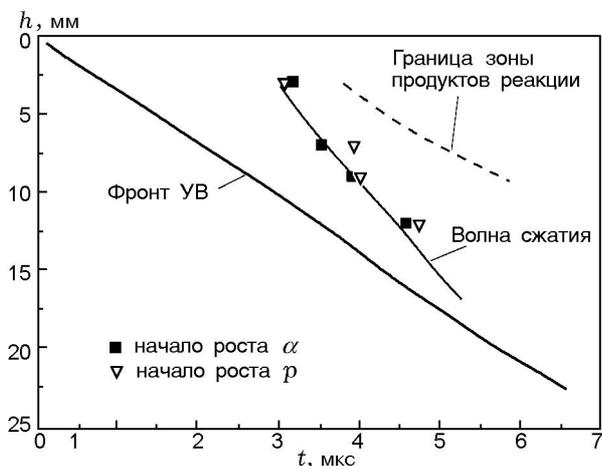


Рис. 10.  $h-t$ -Диаграмма движения характерных границ в образце ВВ

в результате разложения вещества за фронтом УВ образуются продукты реакции. Расширяясь, продукты разложения действуют как поршень, сжимают вещество перед собой, образуя волну сжатия. Волна сжатия, распространяясь по уплотненному ударной волной веществу со скоростью  $\approx 6.2$  км/с, через  $\approx 6$  мкс догоняет фронт, который движется со скоростью  $\approx 3.5$  км/с. Дальнейшее развитие процесса зависит от того, насколько волна сжатия усилит распространяющуюся перед собой УВ. Соответственно усиление будет зависеть от интенсивности разложения ВВ за фронтом, которая, в свою очередь, зависит от нагружающего давления. Подобная зависимость получена в работе [12], где проведен анализ профилей массовой скорости для пластического ВВ на основе октогена РВХ 9501.

На рис. 10 нанесены экспериментальные точки, соответствующие началу роста давления  $p$  и степени разложения  $\alpha$  за фронтом УВ (см. рис. 6). Видно, что рост значений  $p$  и  $\alpha$  совпадает с положением волны сжатия (ростом плотности). Таким образом, можно сказать, что с появлением продуктов разложения (поршня) перед ними образуется волна химической реакции, которая догоняет и усиливает фронт УВ. Этот процесс качественно подобен ударно-волновому процессу инициирования детонации в гомогенных ВВ [13].

Описанный метод может быть использован для исследования инертных материалов, «прозрачных» для рентгеновского излучения, например полистирола различной начальной плотности, ПММА, алюминия и др. Параметры  $p$  и  $\rho$  на фронте УВ дают информацию для построения ударной адиабаты, за фронтом — изоэнтропы разгрузки.

Погрешность описанного метода определения  $\alpha$  зависит от погрешностей определения  $p$ ,  $\rho$ ; погрешностей описания «холодной» адиабаты и изоэнтропы продуктов взрыва. Погрешность определения давления составляет  $\approx 10\%$ , плотности —  $\approx 5 \div 7\%$ , адиабата и изоэнтропа описываются с погрешностью  $\approx 5\%$ . Если считать, что указанные погрешности являются случайными и не зависят друг от друга, то погрешность определения  $\alpha$  не будет превышать  $\approx 15\%$ . Здесь не учитывался возможный источник погрешности, который связан с предположением об одинаковом состоянии вещества за фронтом в момент определения плотности и давления. Кроме этого, измерения  $\rho$

и  $p$  в предложенном методе проводятся в разных системах координат (лагранжевой и эйлеровой). Можно оценить смещение датчика давления с потоком вещества за фронтом следующим образом. При давлении  $\approx 8$  ГПа в экспериментах массовая скорость не превышает  $\approx 0.8$  мм/мкс. За максимальное время измерения давления  $\approx 3$  мкс датчик сместится в направлении движения фронта УВ на  $\approx 2.4$  мм. Это соответствует отклонению от линии, на которой определяется  $\rho(t)$ , на  $\approx 2$  мм. Это оценка — максимальная; на самом деле, отклонение меньше, так как массовая скорость за фронтом достигает значения  $\approx 0.8$  мм/мкс не сразу, а постепенно. Реальное отклонение, по оценкам авторов, не превышает  $\approx 1$  мм и не является источником существенных ошибок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема проведения эксперимента, позволяющая в одном опыте одновременно измерять зависимости  $p(t)$  и  $\rho(t)$ . По полученным зависимостям можно проследить изменение фазового состояния вещества за ударным фронтом в координатах  $p$ - $V$  и рассчитать изменение степени разложения взрывчатого вещества  $\alpha$  во времени после прохождения фронта УВ. Для взрывчатого состава на основе флегматизированного октогена получены зависимости формальной кинетики разложения ВВ за фронтом ударной волны.

Полученные данные позволили выявить закономерности развития взрывчатого превращения за фронтом УВ при ударно-волновом нагружении гетерогенных ВВ.

При нагружении взрывчатого состава на основе октогена ударной волной амплитудой 2.5 ГПа за фронтом через  $\approx 3$  мкс образуются продукты реакции. Расширяясь, продукты разложения действуют как поршень и сжимают вещество перед собой, образуя волну сжатия. Волна сжатия, распространяясь по уплотненному ударной волной веществу со скоростью  $\approx 6.2$  км/с, через  $\approx 6$  мкс догоняет фронт УВ, который движется со скоростью  $\approx 3.5$  км/с, и усиливает его.

Показано, что расстояние от фронта УВ до начала интенсивного роста давления и степени разложения ВВ совпадает с положением волны сжатия.

Полученные результаты полезны для численного моделирования процесса ударно-волнового инициирования ВВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tarver C. M., Hallquist J. O., Erickson L. M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives // 8th Symp. (Intern.) on Detonation. New Mexico, 1985. V. 3. P. 884.
2. Уткин А. В., Фортва Т. И., Канель Г. И. и др. Расчет неидеальной детонации тротила на основе эмпирического уравнения макрокинетики // Хим. физика. 1988. Т. 7, № 9. С. 1257.
3. Канель Г. И., Дремин А. Н. Разложение литого тротила в ударных волнах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 1. С. 85–92.
4. Nutt G. L., Erickson L. M. Reactive flow lagrange analyses in RX-26-AF // Shock Waves in Condensed Matter. 1983. LLNL. California 94550.
5. Андреев С. Г., Зюзин В. В., Имховик Н. А., Соловьев В. С. Основы метода квазитонких слоев для извлечения кинетики разложения ВВ при динамических нагрузках // Хим. физика. 1990. Т. 9. С. 945.
6. Зубков П. И., Кулипанов Г. Н., Лукьянчиков Л. А., Ляхов Н. З., Тэн К. А., Титов В. М., Толочко Б. П., Федотов М. Г., Шарафутдинов М. Р., Шеромов М. А. Измерение плотности вещества за фронтом ударных и детонационных волн с помощью синхротронного излучения // Междунар. конф. «III Харитоновские тематические научные чтения». Саров: ВНИИЭФ, 2001. С. 306–311.
7. Zumbro J. D., Adams K. J., Alrick K. R., et al. Proton radiography of the detonation front in HE systems // 11th Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1998. P. 54.
8. 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.
9. Аринин В. А., Ткаченко Б. И. Применение проективных преобразований при метрологической обработке изображений // Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Сер. Цифровая обработка сигналов и ее применение. 2006. Вып. VII-2. С. 464.
10. Salisbury D. A., Taylor P., Winter R. E., Gustavsen R. L., Sheffield S. A., Alcon R. R. Single and double shock initiation of EDC37 // 12th Intern. Detonation Symp., August 11–16th, San Diego, California, 2002.
11. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 114–126.
12. Lambourn B. D. An interpretation of particle velocity histories during growth to detonation // Shock Waves in Condensed Matter. Portland, Oregon, 2003. P. 367.

13. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. Ф., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996, С. 208.

*Поступила в редакцию 12/XI 2007 г.*

---