

Заклучение

В настоящей работе предпринята попытка описания новых экспериментальных данных о возбуждении детонации в составе на основе октогена слабыми ударными волнами посредством учёта в расчётах индукционного периода с помощью двухстадийной кинетической модели детонации «ОЧАГ». На первой стадии модели рассчитывается разогрев микроскопических объёмов ВВ (горячие точки) вследствие гомогенной экзотермической реакции в условиях теплообмена с окружающим материалом. При достижении определённой температуры горячая точка становится очагом, гомогенная реакция разложения сменяется гетерогенной и начинается стадия послойного горения ВВ. Расчёт разогрева горячих точек за счёт объёмной экзотермической реакции разложения принципиально отличает предложенную модель от прочих.

Использование этой новой модели при численном моделировании позволило корректно описать новые экспериментальные данные, полученные в рамках исследования особенностей процесса инициирования детонации в составе на основе октогена слабыми УВ.

Авторы выражают благодарность В.М. Бельскому и О.А. Тюпановой за полезные консультации и обсуждение модели.

Список литературы

1. Я.Б.Зельдович, Д.А.Франк-Каменецкий. Теория теплового распространения пламени. // ЖФХ, 1938, т. 12, №1, с. 100-105.
2. Н.Н.Семенов. К теории процессов горения. // Ж. Физика. 1928, т. 60, № 3, с. 241-250.
3. Д.А.Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. // М.: Наука, 1987, с. 494.
4. Б.В.Алексеев, А.М.Гришин. Физическая газодинамика реагирующих сред. // М.: Высшая школа, 1985, с. 464.
5. Б.В.Ерофеев. // ДАН СССР, 1946, №52, с. 511.
6. G.Damamme. Contribution à la théorie hydrodynamique de l'onde de détonation dans les explosifs condensés. // Thèse d'état présentée à l'université de Poitiers, 1987.
7. A.P.Esposito, D.L.Farber, J.M.Zaug, J.E.Reaugh. Reaction propagation rates in HMX at high pressure. // Combustion, Explosion and Shock Waves, 37(3), 2003, p. 83-88.
8. J.M.Zaug, C.E.Yong, G.T.Long, J.L.Maienschein, E.A.Glascoe, D.W.Hansen, J.F.Wardell, C.K.Black,G.B.Sykora. Deflagration rates of secondary explosives under static MPa-GPa pressure. // Shock Compression of Condensed Matter, 2009, p 420-423.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТОНКИХ ПРЕГРАД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ВВ ВБЛИЗИ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ

В.И. Таржанов, А.В. Воробьёв, А.Н. Еськов, Д.П. Кучко, М.А. Ральников, Р.В. Комаров

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

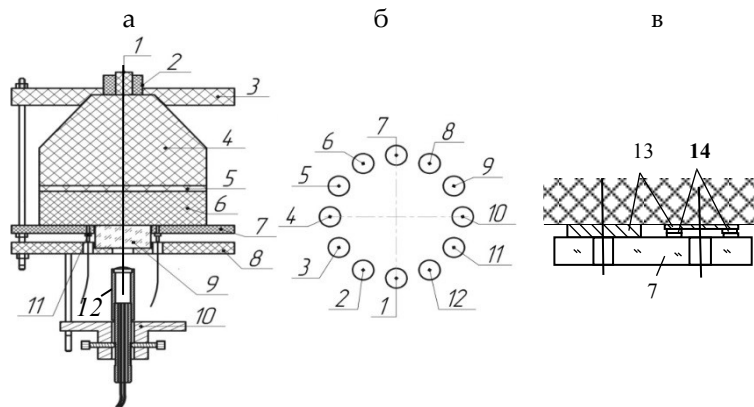
Известные на сегодня экспериментальные данные по ударной сжимаемости не реагирующих ВВ получены в диапазоне низких давлений $p \leq 16$ ГПа [1-4]. С другой стороны, в последние годы фотоэлектрическим и лазерно-интерферометрическим методами с высоким временным разрешением зарегистрированы параметры мощных и промышленных ВВ на пике Неймана (химпике), которые трактуются как точки ударной адиабаты ВВ, не реагирующего какое-то малое время за детонационным фронтом [5-11]. Закономерны вопросы – в течение какого времени

остаётся ВВ не реагирующим за фронтом, остаётся ли оно не реагирующим при повторном нагружении выше пика Неймана?

Предложен экспериментальный метод, позволяющий установить возможность разложения ВВ за фронтом детонации вблизи него – метод тонких преград с лазерно-интерферометрической диагностикой. Метод преград применялся ранее [12, 13] с электроконтактной регистрацией для подтверждения наличия химпика в соответствии с теорией детонации Зельдовича, Неймана, Дёринга [14]. Применение лазерно-интерферометрической диагностики открывает новые возможности метода.

Постановка экспериментов

Проведены эксперименты, в которых при совмещении лазерно-интерферометрических методик VISAR и лазерно-гетеродинной методики (ЛГМ – за рубежом – PDV (Photonic Doppler Velocimetry) [16]) [11, 15] диагностировалось ускорение фольг из разных металлов (Al, Cu, Ni) с толщинами 0,03...0,3 мм, устанавливаемых на поверхности зарядов пластифицированного ТАТБ (ПТАТБ) с пористостью 1,12, а также регистрировались детонационные профили через окно из LiF, имеющего со стороны ВВ покрытие из Al толщиной 2,5 мкм (рисунок 1). Фольги устанавливались на ВВ с поджимом держателем феррул через набор колец, вырезаемых из этой же фольги.



1 – электродетонатор; 2 – розетка; 3 – центратор; 4 – линзовый заряд; 5 – шашка ТГ55 Ø120x10 мм; 6 – исследуемое ВВ Ø120x40...60 мм; 7 – держатель феррул; 8 – прижим; 9 – окно (LiF); 10 – измерительный узел; 11 – феррулы ЛГМ; 12 – «совмещённая» головка; 13 – фольги; 14 – кольца

Рисунок 1. Схема экспериментальной сборки (а), расположение фольг

Детонационная волна с плоским фронтом формировалась в заряде исследуемого ВВ инициирующей системой, состоящей из электродетонатора, взрывной линзы и шашки ТГ55. Для формирования зондирующего лазерного пучка и приема излучения в измерениях с фольгами использовались феррулы с диаметром 2,25 мм. Феррула это – металлический цилиндр, в осевое отверстие которого вклеено одномодовое волокно диаметром 250 мкм с отполированным торцом. Расстояние от феррул до фольг равнялось 1 мм. Зондирование контактной поверхности «ВВ-LiF» и приём от неё излучения в «совмещённой» головке, содержащей световоды разных методик, осуществлялись с помощью оптической линзы Ø12,7 мм с фокусным расстоянием $f = 15$ мм. Диаметр пятна зондирования устанавливался равным 0,3 мм.

Результаты

Пример обработки первичной информации в виде профилей ускорения фольг приведен на рисунке 2, там же показана t, x – диаграмма волновых циркуляций в фольге. Видно, что на границе ВВ с фольгой возникают состояния с массовыми скоростями u_1, u_2, u_3 , которые при разлёте на

свободной поверхности фольги обеспечивают скорости W_1, W_2, W_3 , регистрируемые в виде скачков с «полочками».

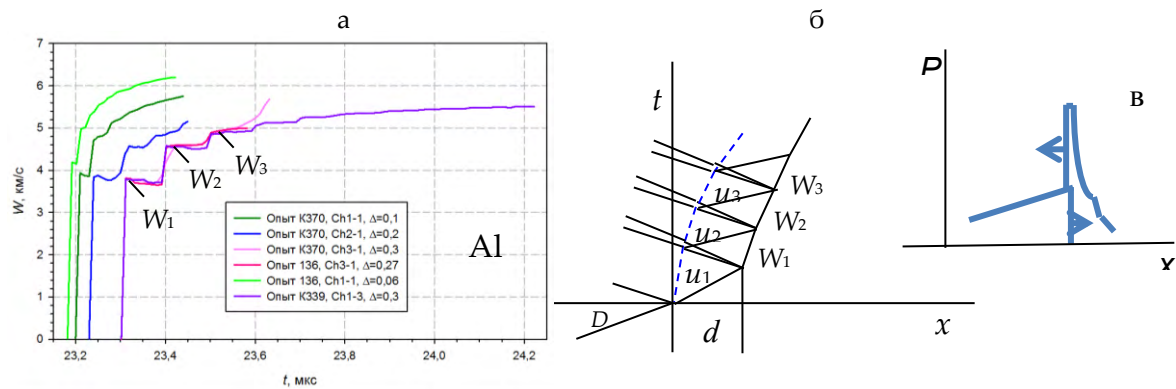


Рисунок 2. Профили ускорения фольг из Al разной толщины (а); t, x - диаграмма волновых циркуляций в фольге (б); формирование профиля повторного нагружения и разгрузки BB (в)

В связи с тем, что первая и последующие ударные волны, входящие в фольгу, затухают при прохождении по её толщине, прямое использование значений W_1, W_2 и W_3 для установления состояний в BB, возникающих сразу после распада разрывов на границе «BB-материал фольги», было бы некорректным. Необходимо вычислять массовые скорости на этой границе по скоростям свободной поверхности W_{01}, W_{02}, W_{03} фольги нулевой толщины. Такие скорости можно находить, экстраполируя экспериментальные зависимости W_1, W_2 и W_3 от толщины фольги d до пересечения с осью ординат (рисунок 3). Такой метод является фактически методом виртуального зондирования состояний BB вблизи детонационного фронта за предельно короткое время, близкое к нулю. прямое использование значений W_2 и W_3

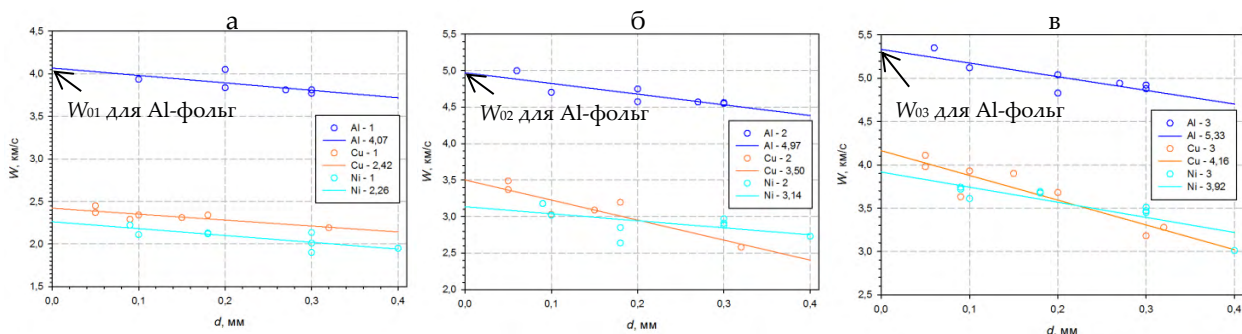


Рисунок 3. Регистрируемые скорости свободной поверхности фольг из Al, Cu и Ni на первом скачке – W_1 (а), втором скачке – W_2 (б) и третьем скачке – W_3 (в) в зависимости от их толщины. Нахождение W_{01}, W_{02} и W_{03}

Вычисленные значения W_{01}, W_{02}, W_{03} , а также соответствующие им значения массовых скоростей u_{01}, u_{02}, u_{03} и давлений P_{01}, P_{02}, P_{03} , найденные методом P, u - диаграмм, приведены в таблице и на рисунке 4.

Таблица. Вычисленные значения $W_{01}, W_{02}, W_{03}, u_{01}, u_{02}, u_{03}$ и P_{01}, P_{02}, P_{03}

Материал фольги	$W_{01}, \text{ км/с}$	$W_{02}, \text{ км/с}$	$W_{03}, \text{ км/с}$	$u_{01}, \text{ км/с}$	$u_{02}, \text{ км/с}$	$u_{03}, \text{ км/с}$	$P_{01}, \text{ ГПа}$	$P_{02}, \text{ ГПа}$	$P_{03}, \text{ ГПа}$
Al	4,07	4,97	5,33	2,035	4,52	5,15	44,7	7,41	2,73
Cu	2,42	3,50	4,16	1,21	2,96	3,83	62,1	23,0	13,0
Ni	2,26	3,14	3,92	1,13	2,70	3,53	63,2	20,2	17,4

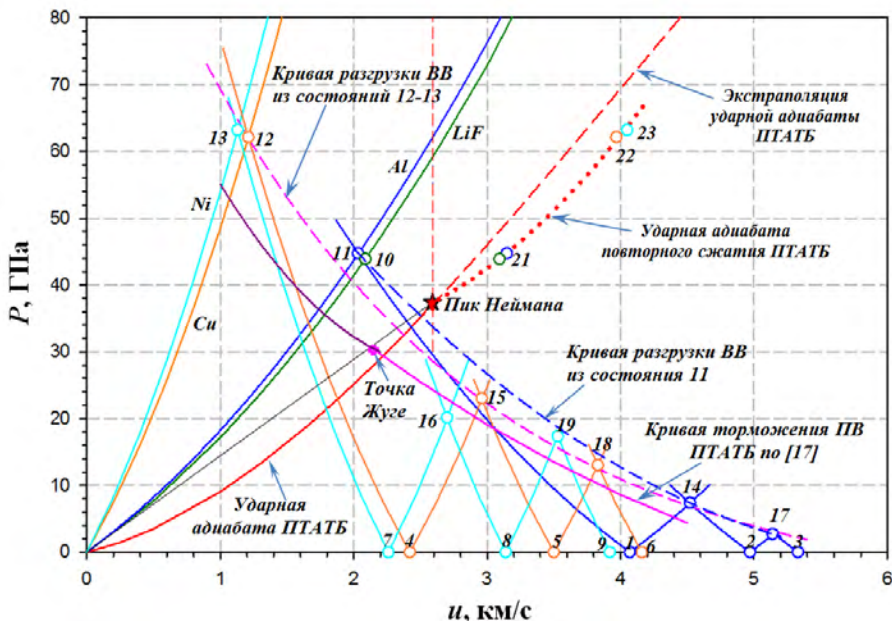


Рисунок 4. P, u -диаграмма состояний в материалах фольг, LiF и исследуемом ВВ, реализующихся при волновых взаимодействиях

Точки: 1, 2, 3 – скорости свободной поверхности фольги из алюминия на первом, втором и третьем скачках – $W_{01Al}, W_{02Al}, W_{03Al}$ при её толщине $d \rightarrow 0$; 4, 5, 6 – то же для фольги из меди – $W_{01Cu}, W_{02Cu}, W_{03Cu}$; 7, 8, 9 – то же для фольги из никеля – $W_{01Ni}, W_{02Ni}, W_{03Ni}$; 10 – массовая скорость на границе «ВВ-LiF», 11, 12, 13 – найденные по $W_{01Al}, W_{02Al}, W_{03Al}, W_{01Cu}, W_{02Cu}, W_{03Cu}, W_{01Ni}, W_{02Ni}, W_{03Ni}$ состояния на ударных адиабатах алюминия, меди, никеля, реализующиеся при выходе состояния Неймана на фольгу; 14, 15, 16 – состояния на границе «ВВ-фольга» после первой волновой циркуляции по фольге из алюминия, меди, никеля; 17, 18, 19, – то же после второй циркуляции; 20, 21, 22, 23 – найденные по точкам 10–13 состояния ВВ, реализующиеся сразу после отражения детонационного фронта от фольги, принадлежащие к искомой ударной адиабате повторного нагружения;

○ – усреднённое для трёх опытов состояние на границе ВВ-LiF при выходе детонационного фронта;

★ – состояние на пике Неймана в ПТАТЬ, найденное по состоянию ○.

Кривая торможения химпика

Состояния в ПТАТЬ на ударной адиабате повторного сжатия находятся следующим образом. Сначала по значениям W_{01} для всех материалов фольг находятся соответствующие массовые скорости в этих материалах с использованием общеизвестного соотношения $u_{01} = W_{01}/2$. По u_{01} находятся давления P_{01} по интерполяционным уравнениям ударных адиабат материалов фольг из [18]. На рисунке 4 это – состояния 11, 12, 13 соответственно для Al, Cu, Ni. Ясно, что эти состояния являются одновременно состояниями ПТАТЬ после отражения детонационного фронта от соответствующей фольги. Состояние 10 в LiF является одновременно состоянием ВВ после распада разрыва на границе ВВ – LiF. Следовательно, точки 10, 11, 12 и 13 это – точки ударной адиабаты повторного нагружения исследуемого ВВ из состояния в химпике. Адиабата должна располагаться выпуклостью влево, поскольку нагружение ВВ при отражении от фольги было встречным. Данная адиабата, построенная аппроксимацией экспериментальных точек, может быть названа кривой торможения химпика по аналогии с кривой торможения ПВ.

Состояния в ПТАТЬ после однократной и двукратной разгрузки фольг

По значениям W_{01} и W_{02} для всех материалов фольг находились состояния 14, 15 и 16 с массовыми скоростями u_{02} в этих материалах с использованием соотношения $u_{02} = W_{01} + (W_{02} - W_{01})/2$. По u_{02} находятся давления P_{02} с использованием ударных адиабат материалов фольг. Состояния 17, 18 и 19 (рисунок 4) с массовыми скоростями u_{03} в этих материалах находились

по соотношению $u_{03} = W_{02} + (W_{03} - W_{02})/2$. По u_{03} вычислялись давления P_{03} с использованием ударных адиабат материалов фольг. Понятно, что и состояния 14–16, и состояния 17–19 являются одновременно состояниями ПТАТБ соответственно после однократной и двукратной разгрузки из состояний повторного нагружения 11–13. На рисунке 4 построены соответствующие кривые разгрузки, аппроксимирующие экспериментальные данные. Видно, что эти кривые разгрузки лежат выше равновесной кривой торможения ПВ с расположенной на ней точкой Жуге из [17]. Объяснение такому расположению понятно – разгрузка ВВ проходила из состояний 11–13, расположенных в зоне химической реакции выше точки Жуге. Отметим, что полученные кривые разгрузки не могут слиться с кривой торможения по [17] в ходе последующих волновых циркуляций по фольгам, поскольку избыток энергии, приобретённый веществом в ходе повторного нагружения остаётся в нём и при разгрузке.

Профили детонационных волн в ПТАТБ. Химпик (пик Неймана)

Результаты регистрации профилей детонационной волны в ПТАТБ на границе с LiF показаны на рисунке 6. Среднее значение максимальной скорости для профилей трёх экспериментов равно 2,084 км/с. Давление в LiF, соответствующее этой массовой скорости, составит 43,8 ГПа. Данное состояние в LiF (точка 10 на рисунке 4) является одновременно состоянием в ПТАТБ, реализующимся при повторном нагружении его на LiF из состояния в химпике.

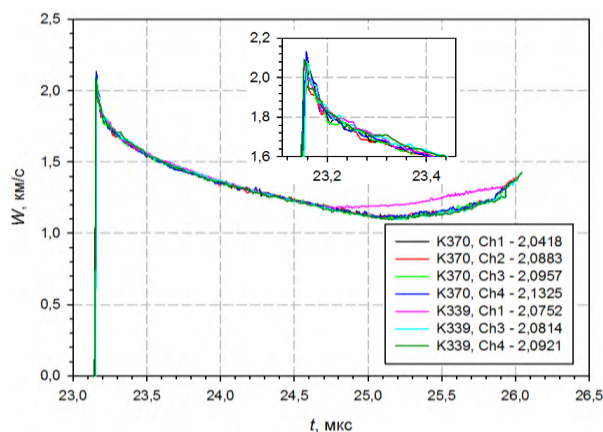


Рисунок 5. Семь профилей детонационной волны в ПТАТБ на границе с окном из LiF, полученные в двух экспериментах

Обсуждение результатов

Физический вопрос, на который надо ответить в данной работе, таков – а что ускоряет фольги после выхода на них детонационного фронта – продукты взрыва (ПВ) или ещё непрореагировавшее «инертное» ВВ, существующее на ширине химпика? Используемые фольги тонкие, и время одной-двух циркуляций волн по ним может быть меньше длительности зоны разложения исследуемого ПТАТБ. В таком случае можно полагать, что уж за время первой волновой циркуляции (от 10 до 100 нс) ВВ не успевает значимо разложиться. К тому же, данные $W(d)$ экстраполируются к нулевой толщине фольг, т.е. к предельно малым временам. Отсюда следствие – ВВ должно оставаться твёрдым, как за ударным фронтом повторного нагружения вблизи него, так и при «моментальной» разгрузке.

В целом, новые результаты, полученные в диапазоне времён $< 10 \dots 300$ нс, демонстрируют перспективность исследования состояний ВВ в зоне химпика предложенным методом.

Список литературы

1. LASL Explosive Property Data / Eds. T.R. Gibbs, F. Popolato, University of California Press.: Berkeley, Los Angeles, London, 1980.
2. J.J.Dick, C.A.Forest, J.B.Ramsay, W.L.Seitz, // J. Appl. Phys., 1988, 63 (10).

3. S.A.Sheffield, D.D.Bloomquist, C.M.Tarver, // J. Chem. Phys., 1984, 80 (8), pp. 3831-3844.
4. Е.В.Шорохов, Б.В.Литвинов, // Химическая физика, 1993, т. 12, №5, с. 722-723.
5. S.N.Lubyatinsky, V.G.Loboiko, // Detonation Reaction Zones of Solid Explosives // Proc. of 12th Symp. on Detonation.: Snowmass, Colorado, USA, 1998.
6. А.В.Фёдоров, А.Л.Михайлов, Л.Л.Антонюк, Д.В.Назаров., С.А.Финюшин // ФГВ. 2011. т. 47, №5.
 7. А.В.Фёдоров // Химическая физика. 2005. т.24, №10. с. 13-21.
8. А.В.Фёдоров, А.Л.Михайлов, Л.Л.Антонюк, Д.В.Назаров., С.А.Финюшин Определение параметров зоны химической реакции, состояний пика Неймана и Чепмена-Жуге в гомогенных и гетерогенных ВВ. // Сб. тезисов XII Международной конференции Забабахинские научные чтения, 02-06 июня 2014 г., Снежинск, с.94.
9. С.А.Колесников, А.В.Уткин, В.М.Мочалова, А.В.Анантин, // ФГВ, 2007, т.43, №6.
10. Е.А.Козлов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, А.В.Воробьёв, К.В.Левак, В.А.Маткин., А.В.Павленко, С.Н.Малюгина, А.В.Дулов, // Структура зоны реакции детонирующего мелкозернистого ТАТБ // Труды SWCM-2012, Киев, с. 58-60, 2012.
11. Е.А.Козлов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, А.В.Воробьёв, К.В.Левак, В.А.Маткин., Д.П.Кучко, М.А.Ральников, Д.С.Боярников, А.В.Павленко, С.Н.Малюгина, А.В.Дулов, // Структура зоны реакции ТАТБ при нормальной и пересжатой детонации // Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения, 18 марта – 22 марта 2013 г., г. Саров.
 12. R.E.Duff, E.F.Houston, // J. Chem. Phys., 1965, 23, 1268.
 13. А.Н.Дремин, П.Ф.Похил, // Журнал физической химии, 1961, 34 (11), 2561.
14. Я.Б.Зельдович, А.С.Компанеец. Теория детонации.– М.: 1955, 268 с.
15. Е.А.Козлов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Д.Г.Панкратов, Д.П.Кучко, М.А.Ральников, О совмещении методик оптического рычага и лазерно-гетеродинной для изучения динамических свойств конструкционных материалов // Сб. тезисов XII Международной конференции Забабахинские научные чтения, 02-06 июня 2014 г., Снежинск, с. 229
16. O.T.Strand, D.R.Goosman, C.Martinez, T.L.Whitworth, W.W.Kuhlow, // Rev. Sci. Instr., 2006, 77, 083108.
17. Ю.А.Аминов, Ю.Р.Еськов, М.М.Горшков, В.Т.Зайкин, Г.В.Коваленко, Ю.Р.Никитенко, Г.Н.Рыкованов, // ФГВ, 2002, т. 38, №2, с. 121-124.
18. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р.Ф.Трунина. Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2006, 531 с.

THIN BARRIER METHOD USED TO STUDY KINETICS OF HE DECOMPOSITION NEAR THE DETONATION FRONT

V.I. Tarzhanov, A.V. Vorobiev, A.N. Eskov, D.P. Kuchko, M.A. Ralnikov, R.V. Komarov

RFNC VNIITF, Snezhinsk, Russia

Currently available experimental data on shock compressibility of nonreactive explosives are obtained in the low-pressure range, i.e. at $p \leq 16$ GPa [1-4]. However in recent years, the high time-resolution photoelectric and laser-interferometric methods gave parameters of both high and commercial explosives at the Neumann peak (chemical peak) and these parameters are interpreted as points of the Hugoniot adiabat for HE that remain unreacted shortly behind the detonation front [5-11]. Reasonable question arises as to how long this HE fails to react behind the detonation front and whether it continues to be non-reacting in case of repeated loading above the Neumann peak.