

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ НА СТРУКТУРУ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПРЕССОВАННОМ TNETB

В. М. Мочалова, А. В. Уткин, А. В. Ананьин

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru

С использованием интерферометра VISAR исследована зона реакции в стационарных детонационных волнах в прессованном TNETB при различных начальной плотности ($1.23 \div 1.71 \text{ г/см}^3$) и дисперсности (5 и 80 мкм) исходного порошка взрывчатого вещества (ВВ). Показано, что границы интервала начальной плотности, в котором вместо предсказываемого теорией химпика наблюдается рост давления, зависят от дисперсности ВВ. Необычное изменение параметров в зоне реакции объясняется гетерогенной структурой прессованных ВВ, разложение которых носит очаговый характер и частично происходит во фронте волны сжатия. Отработана методика регистрации волновых профилей с использованием окон из LiF, которая подтвердила, что все качественные особенности, наблюдаемые при использовании алюминиевых фольг толщиной ≈ 200 мкм и водяного окна, достоверно отражают структуру детонационной волны.

Ключевые слова: прессованное взрывчатое вещество TNETB, плотность, дисперсность, структура детонационной волны, зона реакции без химпика, лазерный интерферометр VISAR, окна из LiF.

Кинетические закономерности разложения прессованных взрывчатых веществ (ВВ) при детонации определяются гетерогенной структурой зарядов. Изменение дисперсности, условий прессования и других факторов, приводящих к изменениям концентрации и распределения по размерам потенциальных очагов реакции, могут вызвать резкое изменение макрокинетики и привести к качественным изменениям структуры зоны реакции [1]. Этот факт достаточно очевиден, если принять во внимание, что детонационные процессы теоретически обычно рассматриваются в рамках гомогенной среды, а в экспериментах регистрируются осредненные параметры. При таком подходе ширина фронта ударной волны конечна и определяется теми же неоднородностями, что и горячие точки, т. е. процессы во фронте задают начальную скорость реакции и количество ВВ, прореагировавшего в этих очагах непосредственно при сжатии. Классическая теория детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга (ЗНД) [2] исключает разложение ВВ во фронте и тем не менее часто пригодна для качественного описания детонации гетерогенных ВВ, хотя реальная структура волны может быть значительно сложнее.

Известно (см., например, [3, 4]), что в некоторых ВВ вместо химпика регистрируется рост давления в зоне реакции, что необъяснимо в рамках модели ЗНД, однако находит

строгое физическое обоснование при учете реакции ВВ во фронте ударной волны [5–9]. С целью регистрации подобных особенностей и установления их связи со структурой заряда в данной работе проведены экспериментальные исследования стационарных детонационных волн в прессованном взрывчатом веществе TNETB — 2', 2', 2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутирате ($\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_{14}$) при различной начальной плотности зарядов ρ_0 и различной дисперсности исходного порошка: грубодисперсного (с характерным размером частиц 80 мкм) и мелкодисперсного (характерный размер частиц 5 мкм). TNETB — это ВВ со слабоотрицательным (-4.15%) кислородным балансом и плотностью монокристалла 1.839 г/см^3 [10, 11]. Чувствительность TNETB к механическим воздействиям находится на уровне гексогена, а по теплоте взрывчатого превращения превосходит его.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов показана на рис. 1. Детонация в исследуемом ВВ инициировалась ударной волной с амплитудой более 4 ГПа, создаваемой плосковолновым генератором. Диаметр зарядов составлял 30 мм, длина изменялась в диапазоне $40 \div 80$ мм, что обеспечивало выход детонации на стационарный режим. Регистрация волновых профилей осуществля-

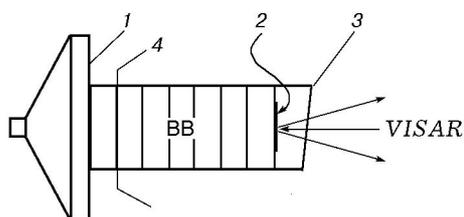


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — плосковолновый генератор, 2 — алюминиевая фольга толщиной $50 \div 200$ мкм, 3 — водяное окно, 4 — ионизационный датчик

лась лазерным интерферометром VISAR с временным разрешением около 2 нс и точностью измерения скорости ± 5 м/с. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной $50 \div 200$ мкм, расположенной между торцом заряда и прозрачным окном. В эксперименте регистрировалась скорость движения поверхности фольги, граничащей с окном, что отражало все детали структуры зоны реакции в детонационной волне. Одновременно с массовой скоростью в каждом эксперименте с использованием ионизационного датчика измерялась скорость детонации D . Погрешность определения D составляла ± 0.25 %.

Ранее были проведены аналогичные опыты с TNETB, в которых использовались водяные окна и алюминиевая фольга толщиной $100 \div 400$ мкм [1, 12]. Было показано, например, что в грубодисперсном TNETB при низких ($\rho_0 < 1.56$ г/см³) и высоких ($\rho_0 > 1.72$ г/см³) начальных плотностях в зоне реакции формируется химпик, тогда как в диапазоне $\rho_0 = 1.56 \div 1.72$ г/см³ он отсутствует. На рис. 2 показан типичный характер изменения скорости движения границы алюминиевая фольга — вода в опытах с грубодисперсным TNETB при переходе через нижнее значение критической плотности. Параметры экспериментальной сборки приведены в таблице, где указаны начальная плотность ρ_0 и пористость φ заряда, толщина алюминиевой фольги h_{Al} , длина заряда ВВ l , материал окна, средний размер частиц ВВ δ и измеренная скорость детонации D . Диаметр заряда ВВ во всех экспериментах составлял 30 мм. Номера опытов в таблице и на рисунках совпадают. При $\rho_0 = 1.48$ г/см³ регистрируется типичная для гетерогенных ВВ картина (зависимость 1 на рис. 2): после ударного скачка наблюдается спад скорости на границе фольга — вода,

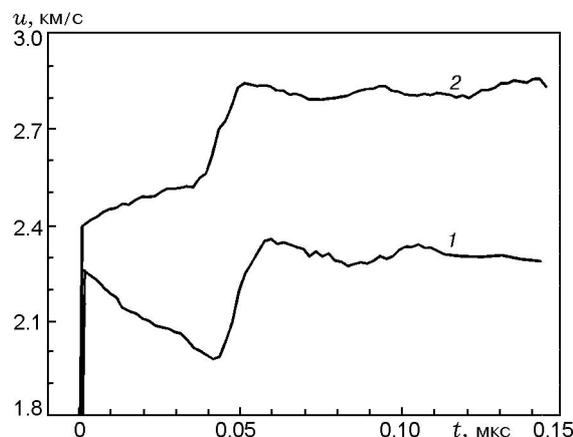


Рис. 2. Скорость движения алюминиевой фольги на границе ВВ — водяное окно в опытах с грубодисперсным TNETB (везде на рисунках номера кривых соответствуют номерам опытов в таблице)

Параметры экспериментальной сборки и характеристики ВВ

Номер опыта	ρ_0 , г/см ³	φ , %	h_{Al} , мкм	l , мм	Окно	δ , мкм	D , км/с
1	1.48	19.5	200	42	Вода	80	7.18
2	1.71	7.0	200	38	—//—	80	8.10
3	1.39	24.4	200	56	LiF	80	6.86
4	1.39	24.4	50	56	—//—	80	6.86
5	1.61	12.5	50	56	—//—	80	7.74
6	1.61	12.5	200	80	Вода	80	7.74
7	1.23	33.1	200	61	—//—	5	6.28
8	1.33	27.7	200	56	—//—	5	6.64
9	1.68	8.6	200	48	—//—	5	7.99
10	1.61	12.5	200	48	—//—	5	7.74
11	1.61	12.5	200	40	—//—	80	7.74

Примечание. Во всех опытах диаметр заряда ВВ 30 мм.

длительность и амплитуда которого определяются параметрами химпика в TNETB. Последующий подъем скорости обусловлен циркуляцией волн сжатия и разрежения в фольге и связан с различием жесткостей Al и H₂O. Момент выхода переотраженной волны на границу Al с H₂O определяется толщиной фольги. При $\rho_0 = 1.71$ г/см³ (зависимость 2 на рис. 2) за ударным скачком вместо химпика в зоне ре-

акции наблюдается рост скорости, т. е. структура детонационной волны не соответствует модели ЗНД [2]. Полученные результаты характеризуются хорошей воспроизводимостью, и их достоверность не вызывает сомнения. Однако вода не является оптимальным материалом для окна в такого рода экспериментах по следующим причинам.

Во-первых, наличие окна из менее жесткого, чем Al, материала приводит к дополнительному переотражению волн (второй подъем скорости на рис. 2), что делает картину течения менее наглядной. Второй, более серьезный недостаток обусловлен тем, что в гетерогенных ВВ фронт ударной волны не является гладким, поэтому, когда толщина алюминиевой фольги оказывается сравнимой с характерным размером неоднородностей в заряде ВВ, осцилляции на фронте не успевают осредниться при прохождении волны по фольге. В результате в момент выхода ударной волны на границу с водой интенсивность отраженного лазерного излучения резко падает до нуля, что не позволяет проводить регистрацию скорости движения границы, и, как показывают многочисленные эксперименты, использование фольг тоньше 100 мкм оказывается невозможным. Кроме того, фронт детонационной волны при прохождении по фольге затухает, следовательно, нельзя использовать слишком толстые фольги. Таким образом, с одной стороны, из-за гетерогенности пресованных ВВ нельзя применять слишком тонкие фольги, а с другой, из-за гидродинамического затухания, — слишком толстые. Ситуация может быть значительно улучшена применением окон из более жестких, чем вода, материалов, например из LiF. При использовании окон из LiF исчезает граница Al — окно, так как жесткость LiF близка к жесткости Al. Следовательно, дополнительное переотражение волн пропадает, и картина течения оказывается более наглядной, чем в опытах с водяными окнами. Кроме того, окна из LiF удобны тем, что из-за его большей, чем у воды, жесткости можно использовать более тонкие фольги.

При этом, однако, возникает проблема, связанная с изменением оптических свойств LiF за фронтом ударной волны, что, в частности, проявляется во вращении плоскости поляризации отраженного лазерного луча. Это приводит к несоответствию характера изменения интенсивности отраженного света и интенсив-

ности света, направляемого в интерферометр. Избежать этого можно, включив в схему интерферометра дополнительный компонент — деполаризатор [13], который представляет собой клинообразную фазовую пластинку из кристаллического кварца. Данная методика незначительно изменяет схему интерферометра и реализована в экспериментах с грубодисперсным TNETB.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ГРУБОДИСПЕРСНЫМ TNETB И ОКНОМ ИЗ LiF

В опытах использовались заряды различной начальной плотности, спрессованные из порошка TNETB со средним размером частиц ≈ 80 мкм. При прессовании зарядов никакие растворители не использовались. Пример профилей скорости в опытах с окном LiF при $\rho_0 = 1.39$ г/см³ приведен на рис. 3. На полученных профилях отчетливо регистрируется пик скорости в зоне реакции, амплитуда которого составляет примерно 400 м/с (т. е. отношение параметров в химпике к параметрам в точке Чепмена — Жуге приблизительно равно 1.4), а длительность 40 ± 5 нс.

Опыты, представленные на рис. 3, различаются толщиной алюминиевой фольги: 200 (кривая 4) и 50 мкм (кривая 3). Изменение толщины фольги в четыре раза не привело к появлению каких-либо особенностей на профилях скорости, лишь в опыте с фольгой толщиной 200 мкм несколько уменьшилась амплитуда пика скорости, что связано с его затуханием

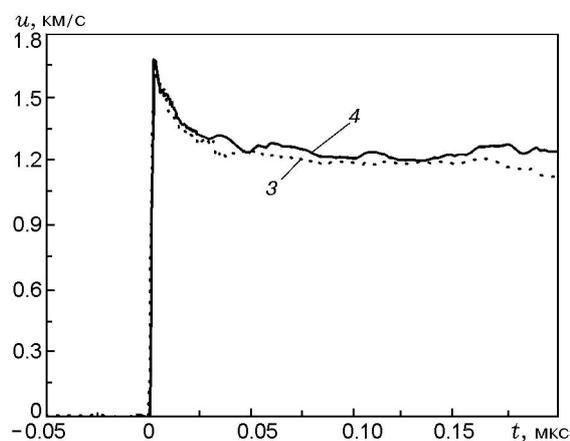


Рис. 3. Скорость движения алюминиевой фольги на границе с окнами из LiF в опытах с TNETB плотностью меньше критической

при распространении по фольге. Одна из целей проведенных экспериментов состояла в выборе наименьшей толщины фольги, при которой можно еще получить воспроизводимые результаты. Оказалось, что использовать фольги толщиной меньше 50 мкм нельзя, поскольку, как только толщина фольги становится сравнимой со средним размером зерна, воспроизводимость результатов резко снижается. Тем не менее применение окна из LiF позволило добиться уменьшения толщины фольги по крайней мере в два раза по сравнению с опытами, проводимыми с водяным окном [1].

Из рис. 3 видно, что конец зоны реакции выражен достаточно отчетливо, градиент скорости волны разгрузки на порядок меньше скорости спада в зоне реакции. Этот профиль точно передает характер распределения скорости в детонационной волне, изменилось лишь ее абсолютное значение из-за различия динамических жесткостей TNETВ и Al. Так как жесткости LiF и Al практически совпадают, это не приводит к дополнительным переотражениям в фольге, как это наблюдалось в опытах с водяным окном (см. рис. 2), и картина течения получается более наглядной.

С использованием окна из LiF были проведены также опыты с TNETВ при $\rho_0 = 1.61 \text{ г/см}^3$, при которой, как было найдено ранее [1], химпик отсутствует. Результаты экспериментов с алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм приведены на рис. 4 (кривая 5). Так же, как и в опытах с водяным окном, где использовалась фольга толщиной 200 мкм, на-

блюдается нарастание скорости в зоне химической реакции. Отсутствие химпика нельзя, таким образом, объяснить его затуханием по мере прохождения по фольге, поскольку, как показывают оценки, для затухания в фольге толщиной 50 мкм длительность химпика должна быть $\approx 1 \text{ нс}$, что невероятно, так как сопоставимо с шириной ударного скачка. Кроме того, если бы химпик затухал, то за ударным скачком регистрировалась бы область постоянных параметров, а не нарастание скорости, как это наблюдается в экспериментах. В качестве примера на рис. 4 приведен также профиль скорости в опыте с толщиной фольги 200 мкм и водяным окном (кривая 6). Видно, что картина течения менее наглядная, чем в случае окна из LiF, что обусловлено дополнительным подъемом скорости, вызванным рассогласованием жесткости Al и воды. Тем не менее основной результат (отсутствие химпика) однозначно регистрируется и в этом случае. Таким образом, отработана методика регистрации структуры зоны реакции в стационарных детонационных волнах с использованием окон из LiF и на примере грубодисперсного прессованного TNETВ показано, что все качественные особенности, наблюдавшиеся ранее при использовании алюминиевой фольги толщиной 200 мкм и водяного окна, отражают физические явления, сопровождающие процесс детонации.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ НА СТРУКТУРУ ВОЛНЫ

Диапазон начальных плотностей, в котором отсутствует химпик, определяется кинетикой разложения ВВ. Следовательно, можно ожидать зависимость границ этого диапазона от дисперсности исходного порошка ВВ. Для исследования данного вопроса были изготовлены образцы различной начальной плотности из мелкодисперсного TNETВ. Мелкодисперсный порошок с характерным размером частиц $\approx 5 \text{ мкм}$ был получен растворением штатного ВВ (с характерным размером частиц 80 мкм) в горячем спирте и осаждением его в воду. Эксперименты проводились с использованием водяных окон при толщине алюминиевой фольги 200 мкм.

Результаты опытов показаны на рис. 5, 6, где приведены профили скорости движения алюминиевой фольги на границе с водяным окном при различной начальной плотности заряда. Видно, что изменение параметров в зоне

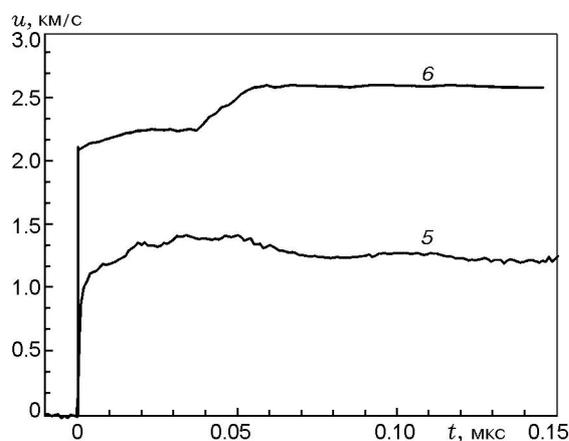


Рис. 4. Скорость движения алюминиевой фольги на границе с окном из LiF (5) и водяным окном (6) в опытах с TNETВ плотностью выше критической

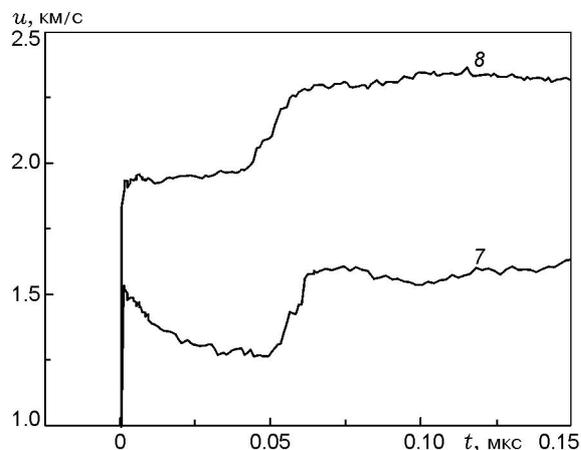


Рис. 5. Скорость движения алюминиевой фольги на границе с водяным окном в опытах с мелкодисперсным TNETB плотностью ниже (7) и выше (8) критической

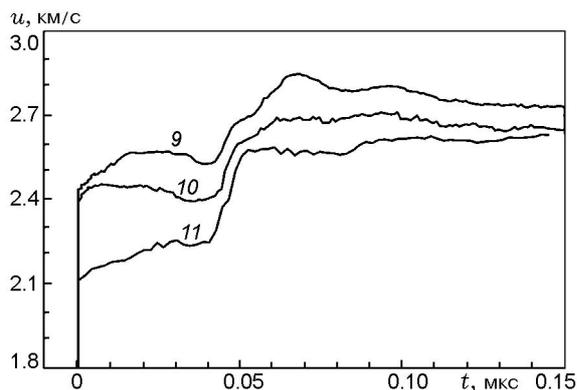


Рис. 6. Скорость движения алюминиевой фольги на границе с водяным окном в опытах с мелкодисперсным (9, 10) и грубодисперсным (11) TNETB

реакции стационарной детонационной волны существенно зависит от плотности заряда. В частности, при $\rho_0 = 1.23 \text{ г/см}^3$ (зависимость 7 на рис. 5) после ударного скачка наблюдается пик скорости с амплитудой 250 м/с и длительностью около 30 нс, что соответствует модели ЗНД. Однако уже при $\rho_0 = 1.33 \text{ г/см}^3$ (зависимость 8 на рис. 5) за ударным скачком регистрируется область постоянных параметров, тогда как в грубодисперсном составе в этом случае наблюдается химпик (зависимость 1 на рис. 2). Т. е. в мелкодисперсном TNETB нижняя граница начальной плотности, при которой химпик исчезает, равна примерно 1.30 г/см^3 , что на 20 % ниже, чем в грубодисперсном. Мак-

симальная начальная плотность, которую удалось получить без использования растворителей, составляет 1.68 г/см^3 (зависимость 9 на рис. 6). Видно, что при увеличении начальной плотности течение в зоне реакции оказывается несколько сложнее, чем в грубодисперсном TNETB, где скорость монотонно возрастает (зависимость 11 на рис. 6). В мелкодисперсном TNETB после ударного сжатия наблюдается рост скорости с последующим формированием пологого максимума (зависимости 9, 10 на рис. 6). Такой характер течения по-прежнему не соответствует модели ЗНД, и можно утверждать, что вплоть до $\rho_0 = 1.68 \text{ г/см}^3$ химпик в мелкодисперсном TNETB отсутствует.

Показано, таким образом, что интервал начальных плотностей, внутри которого химпик отсутствует, а вне его регистрируется классическая детонационная волна с химпиком, определяется кинетикой реакции ВВ и существенно зависит от дисперсности исходного порошка. Полученный результат является следствием гетерогенной структуры исследуемых сред, разложение которых носит очаговый характер и частично происходит во фронте волны сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уткин А. В., Першин С. В., Фортгов В. Е. Изменение структуры детонационной волны в 2', 2', 2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутирате с ростом начальной плотности // Докл. АН. 2000. Т. 374, № 4. С. 486–488.
2. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Детонация. М.: Изд-во Моск. механического ин-та, 1952.
3. Уткин А. В., Колесников С. А., Фортгов В. Е. Структура стационарной детонационной волны в прессованном гексогене // Докл. АН. 2001. Т. 381, № 6. С. 760–762.
4. Уткин А. В., Колесников С. А., Першин С. В. Влияние начальной плотности на структуру детонационных волн в гетерогенных взрывчатых веществах // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 5. С. 111–118.
5. Hirschfelder J. O., Curtiss C. F. Theory of detonations. I. Irreversible unimolecular reaction // J. Chem. Phys. 1958. V. 28, N 6. P. 1130–1147.
6. Linder B., Curtiss C. F., Hirschfelder J. O. Theory of detonations. II. Reversible unimolecular reaction // J. Chem. Phys. 1958. V. 28, N 6. P. 1147–1151.
7. Вильямс Ф. М. Теория горения. М.: Наука, 1971.

8. **Зверев И. Н., Смирнов Н. Н.** Газодинамика горения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
9. **Фикетт У.** Введение в теорию детонации. М.: Мир, 1989.
10. **Price D.** Dependence of damage effects upon detonation parameters of organic high explosives // Chem. Rev. 1959. V. 59, N 5. P. 801–825.
11. **Энергетические** конденсированные системы: Краткий энциклопедический словарь / Под ред. Б. П. Жукова. М.: Янус-К, 1999.
12. **Уткин А. В., Ананьин А. В., Колесников С. А., Першин С. В.** Структура детонационных волн в индивидуальных и смесевых прессованных ВВ // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды междунар. конф. «VII Харитоновские научные чтения, 14–18 марта 2005 г.» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 10–14.
13. **Assay J. R., Barker L. M.** Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, N 6. P. 2540–2546.

Поступила в редакцию 28/VI 2006 г.
