

УДК 534.222.2

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ТЭНЕ

А. В. Уткин^{1,2}, В. М. Мочалова^{1,2}, А. И. Рогачёва¹, В. В. Якушев¹¹Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru²Томский государственный университет, 634050 Томск

С использованием методики VISAR проведены исследования структуры зоны реакции в тэне при различной начальной плотности и дисперсности образцов. Течение в прессованных зарядах соответствует классической модели детонации, тогда как при насыпной плотности регистрируются особенности, которые в большей степени согласуются с моделью взрывного горения. В окрестности начальной плотности 1.7 г/см^3 обнаружен излом на зависимости скорости детонации от плотности и исследован характер ударно-волнового инициирования тэна выше и ниже точки излома.

Ключевые слова: детонация, тэн, зона реакции, ударно-волновое инициирование.

DOI 10.15372/FGV20170210

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают справедливость модели детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга (ЗНД) для гетерогенных взрывчатых веществ (ВВ). Однако к настоящему времени накопилось достаточно много данных, которые не находят объяснения в рамках этой теории. В работах [1–4], например, в ряде взрывчатых веществ (RDX, HMX, ZOХ, TNETB) вместо химпика зарегистрирован рост давления в зоне реакции, что противоречит классической модели детонации, не учитывающей возможность частичного разложения ВВ непосредственно во фронте. Вопрос о том, насколько уникальными являются стационарные детонационные волны без химпика, остается открытым и требует детального исследования. Можно ожидать, что такой характер течения реализуется в высокочувствительных ВВ. Косвенные подтверждения этого приведены в работах [5–8], авторы которых отмечают, что им не удалось зарегистрировать химпик в высокоплотном тэне.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование процессов ударно-волнового инициирования и структуры зоны реакции стационарных детонационных волн в тэне при различной начальной плотности и дисперсности ВВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-01002 «код офи_м»).

© Уткин А. В., Мочалова В. М., Рогачёва А. И., Якушев В. В., 2017.

СТАЦИОНАРНАЯ ДЕТОНАЦИЯ

Образцы тэна различной начальной плотности были спрессованы из порошков различной дисперсности со средним размером частиц 5 и 500 мкм. Диаметр зарядов изменялся в интервале $20 \div 30$ мм, длина составляла не менее 50 мм. Амплитуда инициирующей ударной волны превышала 4 ГПа, что обеспечивало выход детонации на стационарный режим на расстоянии не больше 5 мм [9].

Регистрация волновых профилей осуществлялась лазерным интерферометром VISAR при выходе детонационной волны на границу с водяным окном, аналогично опытам, проведенным в [10]. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной 200 мкм, расположенной между торцом заряда и водой. Экспериментальные данные представляют собой скорость движения поверхности фольги, граничащей с водой, и передают все детали структуры зоны реакции в детонационной волне. В каждом опыте измерялась также скорость детонации.

Начальная плотность образцов изменялась в диапазоне $\rho_0 = 1.40 \div 1.767 \text{ г/см}^3$. Результаты экспериментов с образцами тэна с характерным размером частиц 500 мкм представлены на рис. 1. Во всех опытах регистрируется типичная для гетерогенных ВВ картина: после ударного скачка наблюдается спад скорости u на границе фольга — вода, длительность и амплитуда которого определяются параметрами химпика в тэне. Подъем скорости в момент времени $t \approx 50$ нс обусловлен циркуляцией волн

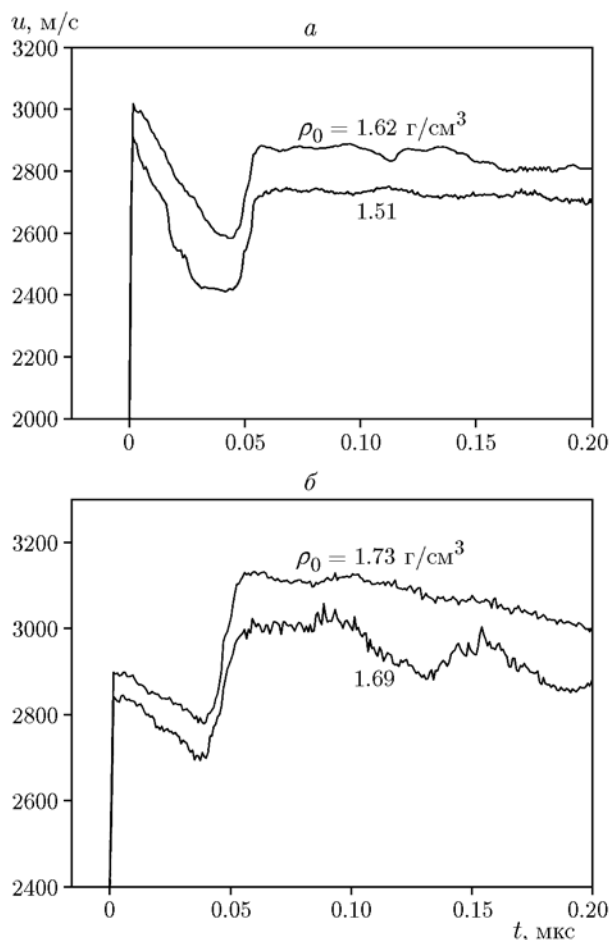


Рис. 1. Профили скорости течения на границе Al/вода при различной плотности образцов тэна

сжатия и разрежения в алюминиевой фольге и не связан со структурой детонационной волны [10].

При $\rho_0 = 1.51$ и 1.62 г/см³ полная длительность пика около 50 нс (рис. 1,а). С увеличением начальной плотности длительность пика скорости изменяется незначительно, а его амплитуда заметно падает, примерно от 400 м/с при 1.51 г/см³ до 200 м/с при 1.69 г/см³ (рис. 1,б). Полученные результаты позволяют утверждать, что во всем исследованном интервале плотностей образцов в зоне реакции наблюдается химпик. При этом следует отметить, что в окрестности $\rho_0 = 1.7$ г/см³ не только фиксируется резкое уменьшение амплитуды химпика, но и отчетливо выражен излом на зависимости скорости детонации D от начальной плотности (рис. 2). Соответствующее давление Чепмена — Жуге около 30 ГПа, поэтому, воз-

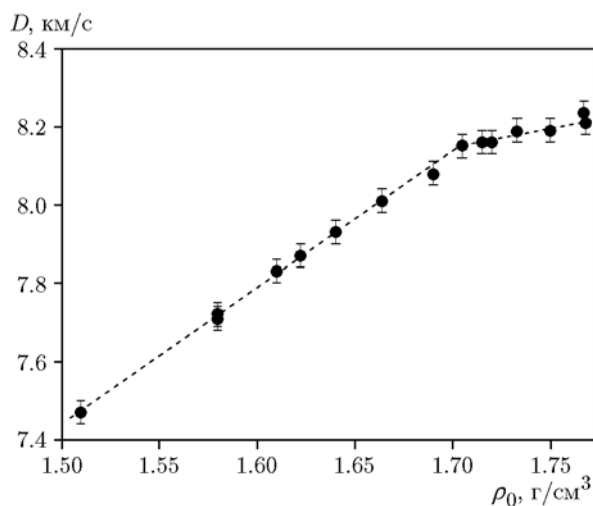


Рис. 2. Зависимость скорости детонации от начальной плотности образцов

можно, излом обусловлен фазовым переходом графит — алмаз, поскольку кислородный баланс тэна отрицательный (−10.1 %). Нелинейный характер зависимости $D(\rho_0)$ наблюдался и ранее [11], однако относительно невысокая точность измерений не позволила авторам [11] зарегистрировать излом.

Изменение дисперсности исходного порошка влияет на макрокинетику разложения ВВ, изменяя тем самым структуру зоны реакции. Так, например, во взрывчатом веществе ТНЕТВ уменьшение размера частиц от 80 до 5 мкм приводит к смещению нижней границы интервала плотностей, внутри которого химпик отсутствует, с 1.56 до 1.33 г/см³ [12]. Для исследования этого явления были приготовлены образцы тэна с характерным размером частиц ≈ 5 мкм. При этом использовался метод растворения исходного порошка в ацетоне с последующим осаждением его в воде. Измеренные профили скорости показаны на рис. 3, где приведены также результаты опытов с образцами тэна с размером частиц 500 мкм при той же начальной плотности. Профили скорости при $\rho_0 = 1.69$ г/см³ очень близки, но увеличение плотности до 1.767 г/см³ приводит хотя и не к ярко выраженному, но тем не менее качественному изменению характера течения в зоне реакции. После ударного скачка скорость продолжает увеличиваться, достигает пологого максимума в окрестности $t = 12$ нс и только затем начинает уменьшаться. Подобное распределение параметров подтверждает отмечавши-

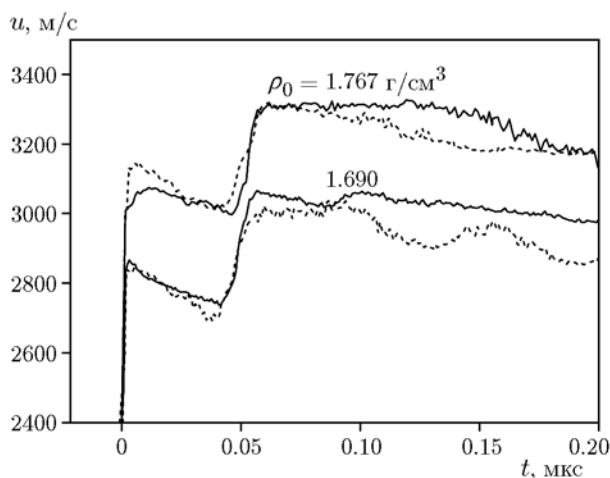


Рис. 3. Профили скорости течения на границе Al/вода для тэна с размером частиц 5 мкм (сплошные линии) и 500 мкм (пунктирные линии)

еся ранее особенности структуры зоны реакции [5–8], необъяснимые в рамках классической модели детонации.

Заметное отклонение характера течения в зоне реакции от предсказываемого классической моделью детонации может наблюдаться не только при высоких, но и при низких, порядка 1 г/см^3 , начальных плотностях ВВ. Возникающие при этом особенности структуры детонационной волны исследовались в [13, 14]. Показана, в частности, сильная зависимость профилей массовой скорости от дисперсности тэна [14]. В образцах со средним размером частиц $\approx 80 \text{ мкм}$ регистрировалась структура волны, в общих чертах соответствующая классической модели. Однако при размере частиц более 200 мкм вместо отчетливо выраженного химпика в зоне реакции наблюдались высокочастотные осцилляции скорости около среднего значения, соответствующего состоянию Чепмена — Жуге. Подобный характер течения авторы [14] объясняют в рамках модели взрывного горения [15], согласно которой продукты реакции истекают в поры и инициируют реакцию исходного ВВ до прихода ударной волны. Осциллирующие профили скорости можно осреднить, используя для отражения зондирующего лазерного излучения алюминиевую фольгу, толщина которой сопоставима с характерным размером частиц ВВ. Такой способ осреднения осцилляций с помощью толстой фольги ранее эффективно использовался при регистрации структуры де-

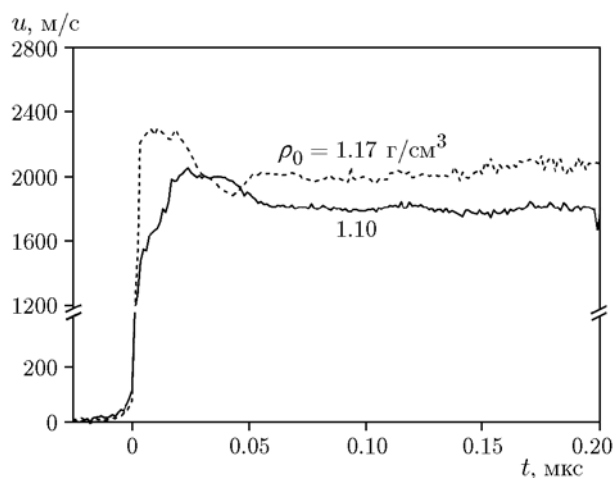


Рис. 4. Профили скорости течения на границе Al/вода при насыпной плотности образцов тэна

тонационных волн в жидких ВВ [16, 17]. Результат опыта с тэном с диаметром частиц 500 мкм приведен на рис. 4. ВВ помещалось в полиэтиленовую оболочку с внутренним диаметром 26 мм и длиной 100 мм . В опыте с зарядом насыпной плотности 1.17 г/см^3 толщина отражающей алюминиевой фольги составляла 200 мкм , а при $\rho_0 = 1.10 \text{ г/см}^3$ — 400 мкм . Видно, что в зоне реакции формируется пик скорости, но его форма достаточно необычна и лишь условно соответствует теории ЗНД. Особенно наглядно это демонстрирует зависимость при $\rho_0 = 1.10 \text{ г/см}^3$, где в течение первых 20 нс после ударного скачка скорость возрастает, а не падает, как это должно быть согласно классическим представлениям. Еще более любопытным фактом оказалось размытие ударной волны при низком давлении. Перед ударным скачком в течение примерно 20 нс скорость плавно нарастает до $\approx 100 \text{ м/с}$, что не наблюдается в прессованных зарядах (см. рис. 1). Вероятно, этот эффект является прямым следствием истечения продуктов реакции в поры насыпного ВВ, что соответствует модели взрывного горения [15].

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ

Кинетика химических реакций не только влияет на структуру зоны реакции в стационарной детонационной волне, но и практически полностью определяет процесс инициирования и развития детонации при ударно-волновом воздействии. В этой связи представ-

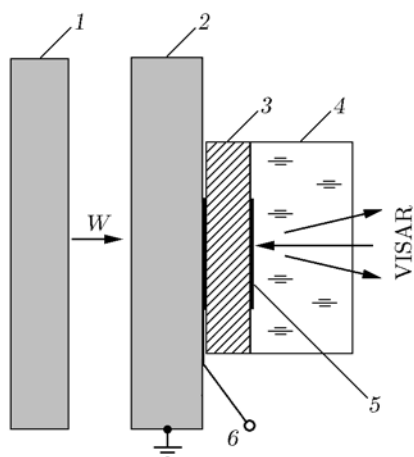


Рис. 5. Схема экспериментов по ударно-волновому инициированию детонации:

1 — ударник, 2 — медный экран, 3 — образец, 4 — вода, 5 — алюминиевая фольга, 6 — поляризационный датчик

ляет интерес сравнить особенности инициирования образцов тэна, начальная плотность которых выше и ниже значения $\rho_0 = 1.7 \text{ г/см}^3$, в окрестности которого наблюдается изменение характера течения в зоне реакции, что отражается в изломе на зависимости $D(\rho_0)$.

Схема экспериментов приведена на рис. 5. Иницирующая ударная волна формируется при соударении алюминиевого ударника толщиной 7 мм, разогнанного продуктами взрыва до $1.13 \pm 0.02 \text{ км/с}$, с медным экраном толщиной 5.5 мм. В образец входит ударная волна, давление в которой остается постоянным в течение 1.7 мкс. Интерферометром VISAR регистрировалась скорость на границе с водой. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной 200 мкм. Изменение толщины образца позволяет проследить эволюцию инициирующего импульса в процессе его распространения. Для согласования профилей скорости, зарегистрированных в различных экспериментах, на границе между экраном и образцом помещался поляризационный датчик, фиксирующий момент входа ударной волны в образец. Результаты, полученные в различных опытах, но при одинаковых условиях, воспроизводятся достаточно хорошо, что демонстрирует рис. 6, на котором сопоставлены профили скорости из двух опытов с образцом толщиной $l = 4.84 \text{ мм}$ и плотностью 1.76 г/см^3 .

Были выполнены опыты с образцами начальной плотности 1.66 и 1.76 г/см^3 , спрессо-

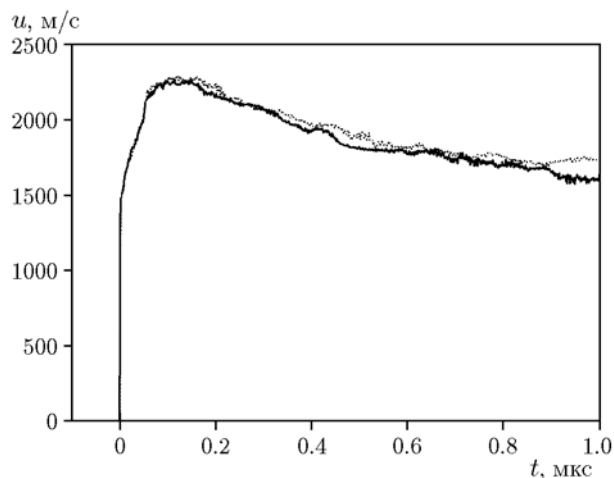


Рис. 6. Профили скорости в различных экспериментах с образцами толщиной $l = 4.84 \text{ мм}$

ванными из порошка со средним размером частиц тэна 500 мкм. Результаты экспериментов приведены на рис. 7, 8. Профиль скорости при толщине $l = 0$ получен при выходе инициирующего импульса из медного экрана в воду. Из-за различия начальных плотностей амплитуда инициирующей ударной волны составляла 3.1 и 3.5 ГПа при $\rho_0 = 1.66$ и 1.76 г/см^3 соответственно.

При $\rho_0 = 1.66 \text{ г/см}^3$ (см. рис. 7) энерговыделение за ударным фронтом, обусловленное химической реакцией, приводит к резкому увеличению амплитуды волны. Причем, пока толщина образца $l < 1.89 \text{ мм}$, скорость после удар-

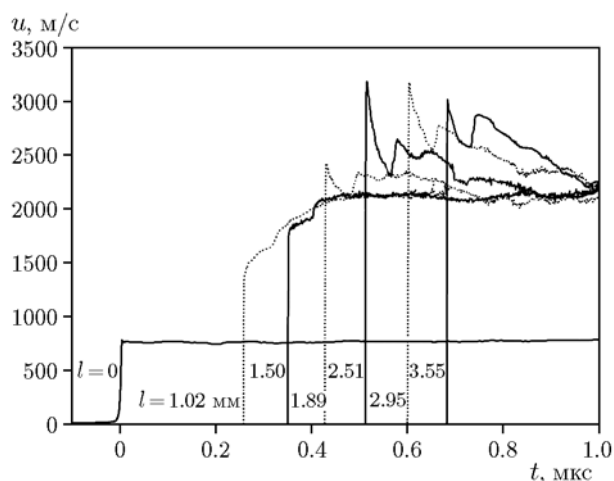


Рис. 7. Эволюция инициирующей ударной волны при плотности образцов 1.66 г/см^3 и различной их толщине

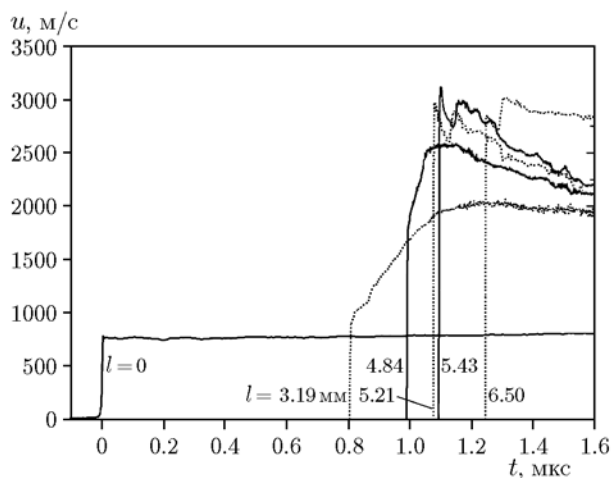


Рис. 8. Эволюция инициирующей ударной волны при плотности образцов 1.76 г/см^3 и различной их толщине

ного скачка продолжает возрастать и плавно выходит на постоянное значение. Начиная с толщины $l = 1.89 \text{ мм}$ и выше максимум скорости реализуется непосредственно за ударным скачком и далее она спадает с формированием характерного пика, аналогичного химпику при стационарной детонации. Причем стационарный режим устанавливается лишь при $l = 3.55 \text{ мм}$, и выход на него осуществляется через пересжатие, поскольку при $l = 2.51$ и 2.95 мм амплитуда ударной волны превышает ее стационарное значение.

Расстояние, которое требуется для установления стационарной детонации при $\rho_0 = 1.76 \text{ г/см}^3$, почти в два раза больше, чем при $\rho_0 = 1.66 \text{ г/см}^3$. Причем сильно затянутым во времени является начальный участок развития детонационного режима. Так, например, если при $\rho_0 = 1.66 \text{ г/см}^3$ амплитуда ударного скачка увеличивается до 1800 м/с на глубине $l = 1.50 \text{ мм}$ за время $t = 0.35 \text{ мкс}$, то при $\rho_0 = 1.76 \text{ г/см}^3$ те же параметры волны реализуются при $l = 4.84 \text{ мм}$ за время $t \approx 1 \text{ мкс}$. Тем не менее, выход на стационарный режим происходит даже быстрее. Сам же процесс установления стационарной детонации также осуществляется через пересжатие. Вероятно, именно последнее обстоятельство приводит к завышенным значениям расстояния, на котором устанавливается детонация, по сравнению со значениями, определенными другими методиками, например клин-тестом [9]. При использовании клин-теста регистрируется изменение во вре-

мени скорости распространения волнового процесса, которая достигает величин, характерных для стационарной детонации, значительно раньше, чем этот режим устанавливается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Регистрация распределения параметров в зоне реакции показывает, что в прессованном тэне всегда наблюдается химпик. Однако характер изменения его параметров в зависимости от начальной плотности образцов и дисперсности ВВ дает основания предполагать возможность исчезновения химпики при определенных условиях. Прежде всего, интерес представляет более детальное исследование влияния дисперсности, поскольку она в значительной степени определяет концентрацию и распределение по размерам горячих точек, возникающих при ударном сжатии и влияющих на начальную скорость реакции.

В проведенных экспериментах частицы исходного порошка ВВ со средним размером 500 мкм имели правильную кристаллическую структуру. В результате переосаждения получены частицы игольчатой формы, толщиной $\approx 1 \text{ мкм}$ и длиной $\approx 5 \text{ мкм}$. Причем частицы образовывали компактные конгломераты со средним размером несколько десятков микрометров. Можно ожидать, что варьирование не только размера, но и формы частиц будет влиять на кинетику реакции, а следовательно, и на структуру течения в зоне реакции. Исследования в этом направлении практически отсутствуют, хотя и вызывают несомненный интерес.

Особый интерес представляет изучение структуры детонационных волн в зарядах насыщенной плотности. В этом случае продукты реакции, истекающие в поры, опережают ударную волну, что приводит, как следует из результатов экспериментов на рис. 4, к уширению ее фронта более чем на 100 мкм . В данном случае, очевидно, нельзя не учитывать реакцию ВВ во фронте ударной волны. Для формального описания возникающего при этом осредненного течения необходимо учитывать процессы переноса в реагирующей среде.

Следует также отметить сложность и значительный произвол в определении характерного времени реакции в прессованных ВВ. Обычно считается, что при наличии химпики ширина зоны реакции совпадает с областью

максимальных градиентов массовой скорости, примыкающей к ударному фронту. Аналогичным образом оценивалась эта величина и в данном случае. Максимальный спад скорости наблюдался за время 50 нс, совпадающее с циркуляцией волн сжатия и разрежения в алюминиевой фольге. Подъем скорости в этот момент искажает картину течения и не позволяет точнее определить время реакции, поэтому значение 50 нс следует, вероятно, считать оценкой снизу. Тем не менее, это значение хорошо согласуется с характерными временами реакции при детонации конденсированных ВВ, которые обычно превышают $20 \div 30$ нс [18].

В отличие от закономерностей течения в зоне реакции, скорость детонации определяется термодинамикой процесса, а не кинетикой реакции, если речь идет о детонации Чепмена — Жуге. Поэтому наличие излома на зависимости $D(\rho_0)$ свидетельствует об изменении состава продуктов взрыва. В прессованных ВВ с отрицательным кислородным балансом подобный эффект наблюдается при давлении Чепмена — Жуге выше 20 ГПа, когда свободный углерод начинает образовываться в алмазной фазе. Вероятно, по этой же причине формируется излом на зависимости $D(\rho_0)$ при $\rho_0 = 1.7$ г/см³ в тэне.

При этом заметно изменяется характер ударно-волнового инициирования выше и ниже точки излома: увеличение начальной плотности на 0.1 г/см³ (примерно на 5 %) приводит к трехкратному увеличению начального участка развития детонационного процесса. То есть наблюдается явление, прямо противоположное тому, которое следует из регистрации структуры зоны реакции, где уменьшение амплитуды с увеличением начальной плотности связывалось с увеличением начальной скорости реакции тэна. Это противоречие кажущееся и находит объяснение в рамках модели горячих точек. При увеличении начальной плотности уменьшается характерный размер горячих точек, что снижает их эффективность в инициировании реакции при низком давлении [18]. При высоком давлении не только все горячие точки являются очагами реакции, но и частичное разложение ВВ происходит при схлопывании пор непосредственно во фронте ударной волны, что и приводит к снижению амплитуды химпика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашаев В. К., Доронин Г. С., Левин А. Д. О структуре детонационного фронта в конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 1. — С. 95–99.
2. Уткин А. В., Першин С. В., Фортков В. Е. Изменение структуры детонационной волны в 2',2',2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутирате с ростом начальной плотности // Докл. АН СССР. — 2000. — Т. 374, № 4. — С. 486–488.
3. 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.
4. Уткин А. В., Мочалова В. М. Неклассические режимы детонации прессованных и жидких взрывчатых веществ (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 77–86.
5. Воскобойников И. М., Гогоуля М. Ф. Свечение ударного фронта в жидкости вблизи границы с детонирующим зарядом // Хим. физика. — 1984. — Т. 3, № 7. — С. 1036–1041.
6. Tarver C. M., Breithaupt R. D., Kury J. W. Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate // J. Appl. Phys. — 1997. — V. 81, N 11. — P. 7193–7202.
7. Lubyatinsky S. N., Loboiko V. G. Density effect on detonation reaction zone length in solid explosives // Shock Compression of Condensed Matter — 1997. — AIP Conf. N 429, 1998. — P. 743–746.
8. Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
9. Wackerle J., Jonson J. O., Halleck P. M. Shock initiation of high-density PETN // Proc. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. — Office of Naval Research, ACR-221, 1976. — P. 20–28.
10. Колесников С. А., Уткин А. В. Неклассические режимы стационарной детонации в прессованном TNETB // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 97–103.
11. Hornig H. C., Lee E. L., Finger M., Kurrle J. E. Equation of state of detonation products // Proc. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. — Office of Naval Research, ACR-184, 1970. — P. 503–512.
12. Мочалова В. М., Уткин А. В., Анашкин А. В. Влияние дисперсности на структуру детонационной волны в прессованном TNETB // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 90–95.

13. **Gustasen R. L., Sheffield S. A., Alcon R. R.** Detonation wave profiles in HMX based explosives // Shock Compression of Condensed Matter — 1997. — AIP Conf. N 429, 1998. — P. 739–742.
14. **Ershov A. P., Kashkarov A. O., Pruel E. R., Satonkina N. P., Sil'vestrov V. V., Yunoshev A. S., Plastinin A. V.** Nomideal detonation regimes in low density explosives // J. Appl. Phys. — 2016. — V. 119. — 075903.
15. **Апин А. Я.** О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. — 1945. — Т. 50. — С. 285–288.
16. **Торунов С. И., Уткин А. В., Мочалова В. М., Гаранин В. А.** Параметры стационарных детонационных волн в растворе ФИФО/нитробензол // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 119–123.
17. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Гаранин В. А.** Исследование структуры детонационных волн в нитрометане и смеси нитрометан/метанол // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 115–121.
18. **Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.

Поступила в редакцию 1/VI 2016 г.
