

УДК 534.222.2

## НЕКЛАССИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ ПРЕССОВАННЫХ И ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ (ОБЗОР)

А. В. Уткин<sup>1,2</sup>, В. М. Мочалова<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru<sup>2</sup>Томский государственный университет, 634050 Томск

Представлен обзор результатов исследования характеристик конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), в зоне реакции которых распределение параметров не соответствует классической теории детонации. Рост давления и массовой скорости за ударным скачком в жидких ВВ и возможность существования стационарной детонационной волны без химпика в прессованных ВВ интерпретируются в рамках моделей, учитывающих возможность химической реакции непосредственно во фронте ударной волны. Отмечается, что при отсутствии химпика может быть реализована как детонация Чепмена — Жуге, так и недосжатый детонационный режим.

Ключевые слова: детонация, химпик, структура детонационной волны, зона реакции без химпика, прессованные взрывчатые вещества, жидкие взрывчатые вещества, гексоген, октоген, TNETB, тэн, нитрометан, смесь нитрометан/диэтилентриамин, тетранитрометан, ФИФО.

### ВВЕДЕНИЕ

Авторы классической теории детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга (ЗНД) [1] обосновали существование стационарной детонационной волны с параметрами Чепмена — Жуге, рассмотрев конкретную структуру зоны реакции. В рамках этой модели взрывчатое вещество (ВВ), не испытывающее каких-либо превращений, сжимается в ударном скачке до состояния, лежащего на его ударной адиабате, и лишь затем начинает реагировать. Предположение о стационарности позволяет в этом случае строго обосновать правило отбора скорости детонации. Одним из выводов теории является существование химпика в зоне реакции. Многочисленные экспериментальные исследования подтвердили справедливость этой модели как для газообразных, так и для конденсированных ВВ. К настоящему времени, однако, накопилось достаточно много данных, которые не находят объяснения в рамках теории ЗНД. Например, авторы [2] в агатированных гексогене и октогене вместо химпика зарегистрировали рост давления в зоне реакции. Исследования [3–13] показали, что аналогичное явление наблюдается и в других ВВ. Предположение о возможности распространения стационарной детонационной волны без химпика

не соответствует классическим представлениям. Более того, не ясно, реализуется ли в этом случае режим Чепмена — Жуге и каким образом осуществляется правило отбора скорости детонации. Ответы на эти вопросы даны в работах [14–16], авторы которых рассмотрели структуру стационарной детонационной волны в вязкой среде при наличии теплопроводности и диффузии. Показано, что учет ширины фронта ударной волны и происходящих в нем процессов, в том числе химических реакций, влияет на характер течения в зоне реакции и приводит к возможности распространения стационарной детонационной волны без химпика, а также к реализации недосжатых режимов детонации. Следует отметить, что Я. Б. Зельдович также отмечал возможность осуществления при определенных условиях недосжатой детонации, а значит, и отсутствие химпика, что, по его мнению, «... может быть существенно для теории детонации пористых конденсированных взрывчатых веществ» [17].

Из последних публикаций следует отметить, прежде всего, работы [18, 19], в которых численно исследовалось развитие детонации в системе с кинетикой экзотермической реакции, включающей зависимость от скорости изменения удельного объема. Результаты моделирования подтверждают важность учета реакции во фронте волны и позволяют сделать вывод, что основной фактор, приводящий к осуществлению неклассических режимов, имеет кинети-

Работа выполнена при поддержке Росатома в рамках государственного контракта Н.4х.44.90.13.1112 от 20.05.2013.

ческую природу, а не термодинамическую.

Рассмотрение процессов переноса во фронте ударной волны и в зоне реакции усложняет интерпретацию детонационных явлений, поскольку теряются простота и наглядность модели ЗНД. Поэтому, вероятно, и предпринимаются попытки объяснить наблюдаемые экспериментально детонационные волны без химпика в рамках классической теории. Для этой цели используют предположение о пересечении ударных и детонационных адиабат в плоскости давления  $p$  — удельный объем  $V$  [20]. Само по себе это предположение в отношении взрывчатых веществ требует термодинамического обоснования, поскольку химическая реакция выше точки пересечения становится эндотермической, а в самой точке пересечения тепловой эффект реакции при постоянных  $p$ ,  $V$  равен нулю.

В данной работе приведен обзор результатов исследования авторами процессов в прессованных и жидких ВВ, в зоне реакции которых распределение параметров не соответствует классической теории детонации. На основании анализа экспериментальных данных показано, что реализация таких режимов обусловлена кинетикой реакции ВВ.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов показана на вставке к рис. 1. Детонация в исследуемом ВВ ини-

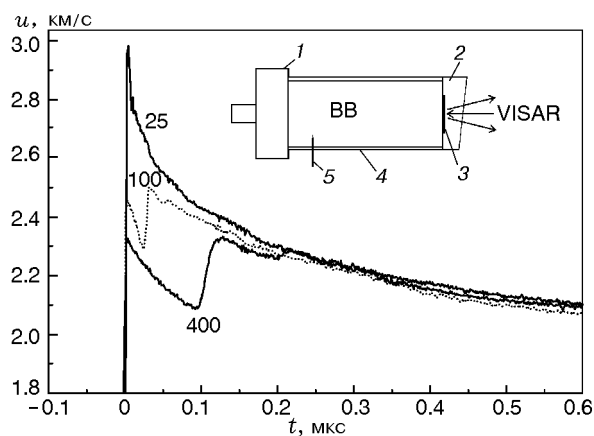


Рис. 1. Профили массовой скорости на границе алюминиевая фольга — вода при детонации тетранитрометана:

цифрами указана толщина фольги, мкм; на вставке — схема эксперимента: 1 — плоскостной генератор, 2 — окно, 3 — фольга (Al), 4 — оболочка заряда, 5 — ионизационный датчик

цировалась плоскостным генератором. Регистрация волновых профилей осуществлялась лазерным интерферометром VISAR, имеющим временное разрешение  $\approx 2$  нс и точность измерения скорости  $\pm 5$  м/с. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги, расположенной между торцом заряда и прозрачным окном. Толщина фольги изменялась в зависимости от степени неоднородности исследуемого ВВ в диапазоне  $7 \div 400$  мкм. При исследовании жидких ВВ заряд помещался в оболочку. Экспериментальные данные представляют собой скорость движения поверхности фольги, граничащей с окном, и передают все детали структуры зоны реакции в детонационной волне.

Типичные профили скорости, полученные данной методикой для тетранитрометана, приведены на рис. 1. После ударного скачка наблюдается спад скорости на границе фольга — вода, длительность и амплитуда которого определяются параметрами химпика в тетранитрометане. Последующий подъем скорости обусловлен циркуляцией волн сжатия и разрежения в фольге. По мере распространения по фольге пик скорости затухает, но применение тонкой фольги, а также фольги различной толщины позволяет учесть это затухание и с хорошей точностью определить параметры в зоне реакции. В рассмотренных ниже экспериментах при исследовании гетерогенных (прессованных) ВВ использовалась алюминиевая фольга толщиной 200 мкм, а для гомогенных (жидких) — 7 мкм. Получаемые с помощью данной методики результаты обладают хорошей воспроизводимостью, и их достоверность не вызывает сомнения. Это подтверждается и численным моделированием течения в слоистой системе, результаты которого приведены на рис. 1 [21].

Одновременно с массовой скоростью в каждом эксперименте измерялась скорость детонации  $D$ , для чего использовались показания датчика (5) как точка отсчета времени. Вторая временная точка соответствовала началу регистрации массовой скорости интерферометром. Погрешность определения  $D$  составляла  $\pm 0.25$  %.

### ПРЕССОВАННЫЕ ВВ

Кинетические закономерности разложения прессованных ВВ при детонации определяются гетерогенной структурой зарядов. Изменение

дисперсности, условий прессования и других факторов, влияющих на концентрацию и распределение по размерам потенциальных очагов реакции, могут вызвать резкое изменение макрокинетики разложения ВВ и привести к качественным изменениям структуры зоны реакции. В то же время нет оснований ожидать, что изменение дисперсности принципиально изменит термодинамические свойства ВВ, в частности, повлияет на взаимное положение ударной и детонационной адиабат.

Наиболее детально исследование влияния исходного размера частиц ВВ на структуру зоны реакции было проведено для взрывчатого вещества 2',2',2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутират  $C_6H_6N_6O_{14}$  (TNETB) [3, 4, 9–13]. С целью установления связи характера течения в зоне реакции со структурой заряда были экспериментально исследованы стационарные детонационные волны в прессованном ВВ при различной начальной плотности зарядов  $\rho_0$  и различной дисперсности исходного порошка — с характерным размером частиц 80 и 5 мкм. Некоторые характерные профили скорости границы 200-микронной алюминиевой фольги с водой приведены на рис. 2.

В образцах TNETB, прессованных из порошка с размером частиц 80 мкм до плотности  $\rho_0 = 1.48 \text{ г/см}^3$  (зависимость 2), после ударного скачка наблюдается спад скорости примерно на 300 м/с, обусловленный наличием химпика в ВВ, длительность которого  $\approx 50$  нс. Однако уже

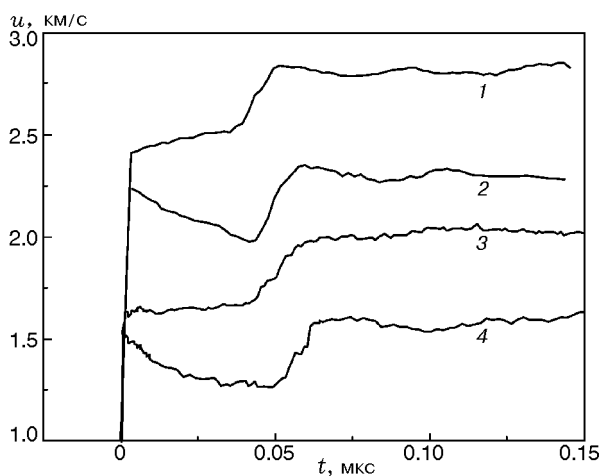


Рис. 2. Профили массовой скорости на границе алюминиевая фольга — вода при детонации TNETB со средним размером частиц 80 мкм ( $\rho_0 = 1.56$  (1) и  $1.48 \text{ г/см}^3$  (2)) и 5 мкм ( $\rho_0 = 1.33$  (3) и  $1.23 \text{ г/см}^3$  (4))

при  $\rho_0 = 1.56 \text{ г/см}^3$  профиль скорости 1 претерпевает качественные изменения: химпик исчезает и за скачком возникает область постоянных параметров. Такая структура зоны реакции сохраняется вплоть до  $\rho_0 = 1.77 \text{ г/см}^3$ . При более высокой плотности химпик появляется вновь. Аналогичная картина течения в зоне реакции с ростом начальной плотности характерна и для образцов TNETB, прессованных из порошка с размером частиц 5 мкм, но происходит это при заметно меньших значениях  $\rho_0$  (профили 3, 4 на рис. 2). При  $\rho_0 = 1.23 \text{ г/см}^3$  (зависимость 4) после ударного скачка наблюдается пик скорости с амплитудой 250 м/с и длительностью около 30 нс, но уже при плотности  $\rho_0 = 1.33 \text{ г/см}^3$  (зависимость 3) за ударным скачком регистрируется область постоянных параметров. То есть в 5-микронном TNETB нижняя граница начальной плотности, при которой химпик исчезает, равна примерно  $1.30 \text{ г/см}^3$ , что на 20 % ниже, чем в грубодисперсном.

TNETB является удобным объектом исследования, поскольку заряды из него хорошо прессуются без использования каких-либо добавок, что характерно не для всех ВВ. Например, при прессовании гексогена и октогена приходится использовать различные растворители, обычно ацетон. Известно [22], что при прессовании частицы ВВ разрушаются и, как следствие, меняется характер их распределения по размерам. Прессование с малым количеством ацетона создает большое количество потенциальных очагов реакции, что приводит к увеличению скорости разложения ВВ. Прессование с большим количеством ацетона позволяет получить ту же плотность при меньшей поврежденности частиц гексогена, что снижает скорость реакции. Результатом этого является влияние условий прессования на структуру зоны реакции, что иллюстрирует рис. 3, на котором приведены профили скорости при взрыве гексогена, заряды которого были спрессованы при малом (менее 1 % ацетона по массе, RDX<sub>1</sub>) и большом (10 % ацетона, агатированный гексоген RDX<sub>2</sub>) количестве растворителя. Характер изменения параметров в зоне реакции для RDX<sub>1</sub> при  $\rho_0 < 1.72 \text{ г/см}^3$  типичен для гетерогенных ВВ (на рис. 3 профиль для  $\rho_0 = 1.51 \text{ г/см}^3$ ): после ударного скачка наблюдается спад скорости на границе фольга — вода, длительность и амплитуда которого определяются параметрами химпика в гексогене. С увеличением начальной плотности длительность пика скорости

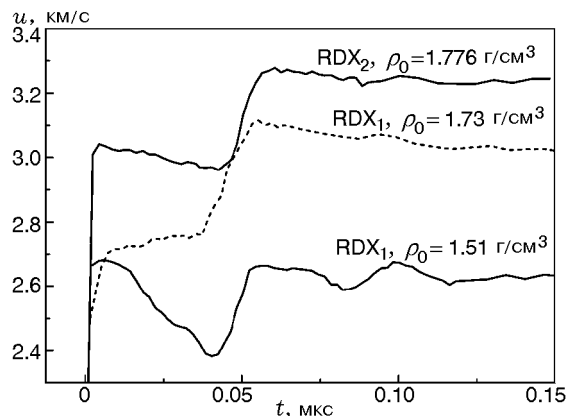


Рис. 3. Скорость границы 200-микронной алюминиевой фольги с водой при детонации зарядов гексогена, изготовленных при различных режимах прессования:

RDX<sub>1</sub> — менее 1 % ацетона, RDX<sub>2</sub> — более 10 % ацетона

сти изменяется незначительно, а его амплитуда заметно падает, и при  $\rho_0 > 1.72 \text{ г/см}^3$  химпик исчезает и ситуация меняется принципиально: после ударного скачка вместо спада наблюдается монотонное увеличение скорости. Соответствующий профиль скорости при  $\rho_0 = 1.73 \text{ г/см}^3$  приведен на рис. 3.

Результаты экспериментов для агатированного гексогена RDX<sub>2</sub> отличаются от того, что можно было бы ожидать, экстраполируя данные, полученные для RDX<sub>1</sub>, на диапазон высоких значений плотности. Во всем измеренном интервале начальной плотности вплоть до  $1.776 \text{ г/см}^3$  отчетливо регистрируется химпик (см. рис. 3). Его амплитуда падает при увеличении  $\rho_0$ , и можно ожидать существование критической начальной плотности, при которой химпик в RDX<sub>2</sub> исчезает в окрестности  $\rho_0 = 1.78 \text{ г/см}^3$ . Этот вывод согласуется с данными работы [2].

Приведенные результаты получены для гексогена со средним размером частиц  $\approx 80 \text{ мкм}$ . Влияние дисперсности на структуру зоны реакции в данном случае проявляется так же ярко, как для TNETВ. Необычный характер изменения течения в зоне реакции при увеличении начальной плотности зарядов гексогена с размером частиц  $\approx 5 \text{ мкм}$  наблюдается при низкой плотности [8]. Профили скорости, приведенные на рис. 4, показывают, что неклассический режим детонации реализуется с хорошей воспроизводимостью в

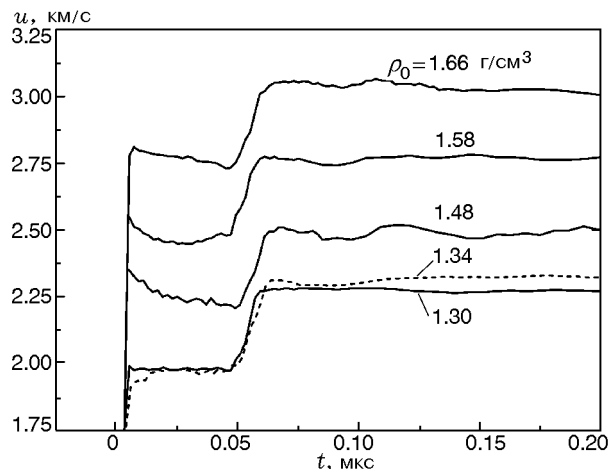


Рис. 4. Профили массовой скорости на границе алюминиевая фольга — вода при детонации гексогена со средним размером частиц 5 мкм

небольшой окрестности плотности  $1.3 \text{ г/см}^3$ . При увеличении  $\rho_0$  химпик появляется, однако его амплитуда мала в сопоставлении с данными для грубодисперсного гексогена той же плотности.

Особенности течения в зоне реакции определяются в первую очередь химической кинетикой в условиях детонации, и чем выше скорость реакции, тем с большей вероятностью можно ожидать возникновения неклассических режимов детонации. Перспективным в этом отношении является, казалось бы, тэн, одно из наиболее чувствительных к ударно-волновому воздействию ВВ. Косвенные подтверждения этого приведены в работах [23–26], авторы которых отмечают, что им не удалось зарегистрировать химпик в высокоплотном тэне. Результаты экспериментов по регистрации профилей массовой скорости на границе с водяным окном показывают, однако, что исчезновение химпика, если и происходит, то лишь при плотности заряда, близкой к максимальной, которая равна  $1.77 \text{ г/см}^3$ . Это видно на рис. 5, на котором приведены некоторые результаты исследования структуры зоны реакции в тэне при различной начальной плотности. При относительно невысокой плотности ( $\rho_0 \approx 1.6 \text{ г/см}^3$ ) наблюдается отчетливо выраженный химпик, амплитуда которого даже после затухания в 200-микронной алюминиевой фольге превышает  $200 \text{ м/с}$ , а длительность составляет не менее  $50 \text{ нс}$ . Химпик сохраняется при увеличении плотности до  $1.73 \text{ г/см}^3$ , хотя его амплитуда резко уменьшается, а длительность остает-

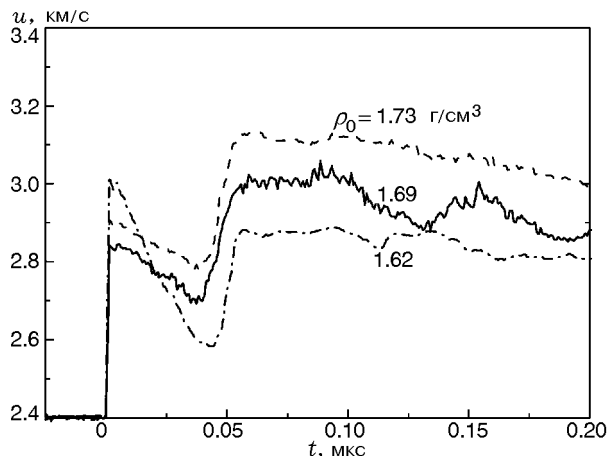


Рис. 5. Профили массовой скорости при детонации зарядов тэна различной начальной плотности

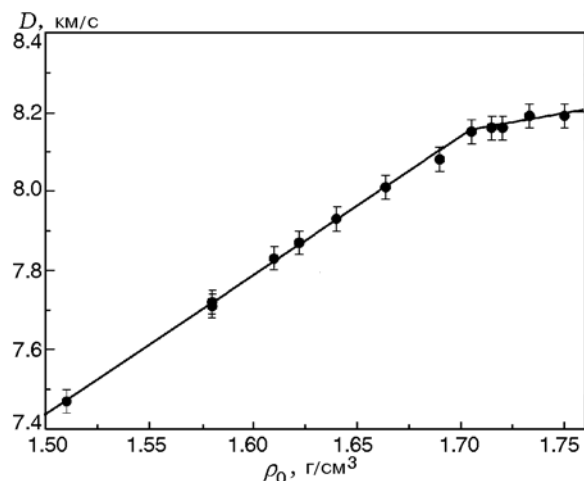


Рис. 6. Зависимость скорости детонации тэна от начальной плотности заряда

ся практически неизменной. Следует отметить, что в окрестности  $\rho_0 = 1.7 \text{ г/см}^3$  заметно меняется не только характер течения в зоне реакции, но и появляется излом на зависимости скорости детонации от начальной плотности (рис. 6). Возможно, что при дальнейшем увеличении  $\rho_0$  химпик исчезнет, но реализовать большую плотность без использования растворителей при прессовании зарядов не удастся. Таким образом, несмотря на высокую чувствительность тэна, при его взрыве не обнаружена ярко выраженная тенденция к аномальному характеру течения в зоне реакции, как это имеет место, например, в случае TNETB.

Как уже отмечалось, при отсутствии химпика может реализовываться как детонация

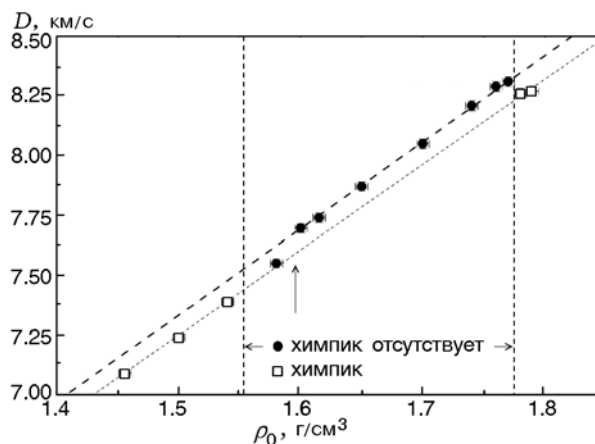


Рис. 7. Зависимость скорости детонации TNETB от начальной плотности

Чепмена — Жуге, так и недосжатый детонационный режим [16]. Поскольку изменение структуры зоны реакции происходит при увеличении начальной плотности, можно ожидать скачок на зависимости детонационных параметров от  $\rho_0$  при переходе от нормального детонационного режима к недосжатому. Это явление действительно наблюдается для TNETB на зависимости  $D(\rho_0)$  [13]. Результаты опытов показаны на рис. 7. Видно, что значения скорости детонации в интервале  $\rho_0 = 1.60 \div 1.77 \text{ г/см}^3$ , где отсутствует химпик, находятся выше зависимости, на которой лежат значения, полученные в опытах с химпиком, причем скачок при переходе с одной кривой на другую составляет около 100 м/с, что превосходит погрешность измерения скорости детонации ( $\pm 20 \text{ м/с}$ ). Отметим, что в диапазоне  $\rho_0 = 1.56 \div 1.60 \text{ г/см}^3$  химпик отсутствует, но при этом реализуется детонация Чепмена — Жуге.

### ЖИДКИЕ ВВ

Макрокинетические закономерности реакции прессованных ВВ при детонации определяются гетерогенной структурой зарядов, приводящей к инициированию реакции в «горячих точках», температура в которых значительно превышает температуру ударно-волнового разогрева. Результатом этого являются высокая начальная скорость реакции и разложение ВВ непосредственно на стадии сжатия, вследствие чего и появляется возможность возникновения детонационных волн без химпика. В отношении жидких ВВ, которые по своей природе

гомогенные, подобная возможность увеличения начальной скорости реакции отсутствует. Более того, именно малые скорости химической реакции приводят к неустойчивости детонационных волн в некоторых жидких ВВ. Тем не менее, существующие к настоящему времени экспериментальные данные позволяют утверждать, что и в жидких ВВ возможно протекание химических реакций непосредственно во фронте ударной волны, что, как и в прессованных ВВ, приводит к аномальному характеру течения в зоне реакции.

Доказательством этого утверждения служат результаты экспериментов по исследованию влияния малых добавок диэтилентриамина (ДЭТА), являющегося сенсibilизатором, на детонационные свойства нитрометана (НМ) [27–29]. На рис. 8 представлены профили массовой скорости на границе с водяным окном при детонации чистого НМ (зависимость 3) и смеси, содержащей 0.25 % ДЭТА (зависимости 1, 2). Зависимости 1 и 2 получены в одинаковых условиях, и их совпадение свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов.

На рис. 8 видны две наиболее яркие особенности, различающие течения в смеси и в чистом НМ. Во-первых, резко изменяется характер зависимости скорости от времени в зоне реакции. В чистом НМ за ударным скачком скорость монотонно уменьшается и в зоне реакции формируется химпик. Причем максимальный градиент скорости реализуется непосредственно за фронтом ударной волны. В смеси регистрируется качественно иной характер изменения скорости. После скачка она продолжает возрастать, в окрестности 10 нс достигает максимума и только затем уменьшается. Во-вторых, малая добавка ДЭТА приводит к существенным количественным изменениям параметров химпика. Например, его амплитуда уменьшается почти на порядок. Следует также отметить хотя и незначительное, но надежно регистрируемое в экспериментах увеличение параметров Чепмена — Жуге относительно НМ. Так, массовая скорость возрастает примерно на 50 м/с, а давление на  $\approx 0.4$  ГПа. Все качественные и количественные особенности, отмеченные для смеси НМ/ДЭТА 99.75/0.25, имеют место в интервале концентраций 0.025 ÷ 1.0 %.

Столь сильное влияние ДЭТА на структуру зоны реакции в смеси с НМ вызвано резким увеличением начальной скорости реакции ВВ даже при малых (сотые доли процента) концентрациях ДЭТА. Оставаясь в рамках классической модели детонации, невозможно объяснить характер тех качественных изменений течения за ударным скачком, которые наблюдаются в экспериментах. В данном случае необходимо учитывать возможность разложения ВВ непосредственно во фронте ударной волны.

Подтверждением этого являются результаты анализа течения в плоскости давление — удельный объем —

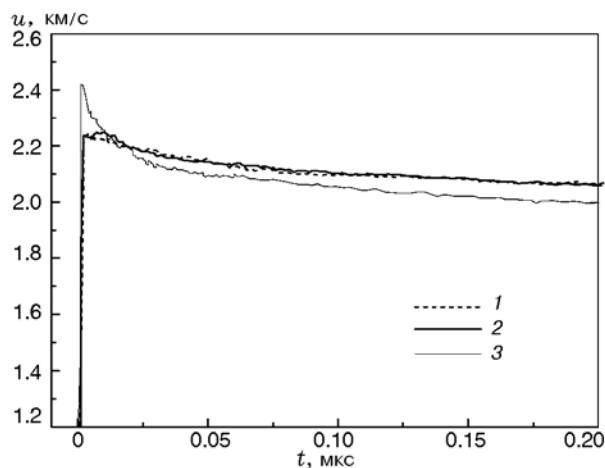


Рис. 8. Профили скорости на границе с водяным окном при детонации нитрометана (3) и смеси, содержащей 0.25 % ДЭТА (1, 2) (толщина алюминиевой фольги 7 мкм)

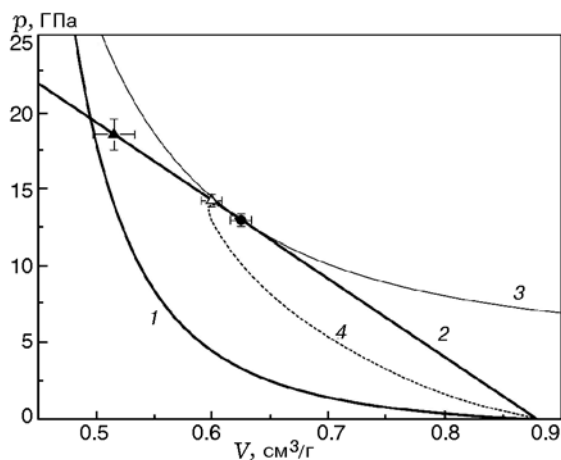


Рис. 9. Анализ течения в плоскости давление — удельный объем:

треугольники — параметры в химпике: темный — нитрометан, светлый — смесь нитрометан/ДЭТА 99.75/0.25; темный кружок — параметры в точке Чепмена — Жуге

удельный объем. На рис. 9 приведена ударная адиабата нитрометана, соответствующая обобщенной ударной адиабате органических жидкостей [30] (зависимость 1):  $D = 1.2c_0 + 1.7u$ , в которой скорость звука при давлении  $p = 0$  равна  $c_0 = 1.34$  км/с [31]. Показаны также волновой луч и качественный характер изменения детонационной адиабаты (зависимости 2 и 3 соответственно). Экспериментально измеренные параметры химпика (темный треугольник) в пределах погрешности совпадают с точкой пересечения волнового луча с ударной адиабатой, т. е. реакцией во фронте можно пренебречь. Темной точкой показаны параметры Чепмена — Жуге для чистого НМ. Светлым треугольником на рис. 9 обозначено значение в химпике при добавлении 0.25 % ДЭТА. Ударная адиабата этой смеси практически не отличается от ударной адиабаты НМ, их волновые лучи также совпадают в пределах точности измерений. Видно, что параметры в химпике значительно ближе к точке Чепмена — Жуге, чем к значениям на ударной адиабате, т. е. часть ВВ прореагировала при сжатии. При расчете этой точки предполагалось, что она лежит на волновом луче, что в общем случае, учитывая эффект переноса в среде, не выполняется. Зависимость 4 на рис. 9 качественно отображает характер фазовой траектории, нижняя ветвь которой соответствует движению во фронте, а верхняя — в спадающей части химпика [16].

Реакция во фронте наблюдается и в других жидких ВВ. В качестве примера на рис. 10 приведены профили скорости для тетранитрометана (ТНМ) и его смеси с метанолом 65/35 [32–34]. В данном случае ТНМ, имеющий положительный кислородный баланс, рассматривается как окислитель, а метанол является горючим. Детонационные свойства этой смеси немонотонно меняются с увеличением концентрации метанола. В составах, близких к раствору с нулевым кислородным балансом (что соответствует соотношению ТНМ/метанол 75.4/24.6), скорость детонации достигает максимума (7.1 км/с), повышается чувствительность к внешним воздействиям [34–36]. Можно ожидать, что увеличивается и скорость реакции за ударным скачком. Именно этим, вероятно, объясняется необычный характер изменения течения в зоне реакции при добавлении метанола.

Полученные результаты для смеси

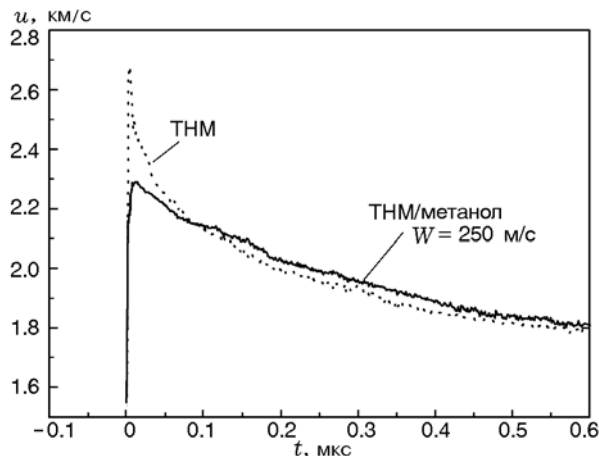


Рис. 10. Профили массовой скорости при детонации тетранитрометана и его смеси с метанолом в соотношении 65/35:

в случае смеси скорость смещена вниз на 250 м/с; толщина алюминиевой фольги 7 мкм

ТНМ/метанол качественно отличаются от результатов для чистого ТНМ. Наиболее ярко это проявляется в амплитуде химпика, которая в растворе почти вдвое меньше, чем в чистом ТНМ. Это приводит, в частности, к тому, что градиент скорости в зоне реакции близок к величине в волне разгрузки. Нет оснований считать, что это обусловлено уменьшением начальной скорости реакции, поскольку столь заметное падение скорости реакции должно было бы привести к потере устойчивости детонационного фронта, тогда как надежная регистрация достаточно гладких профилей скорости свидетельствует об обратном: фронт устойчив. Кроме того, характерные значения параметров в точке Чепмена — Жуге при взрыве смеси ТНМ/метанол в исследованном интервале концентраций близки к параметрам при взрыве ТНМ. Поэтому нет оснований предполагать, что скорость реакции может резко уменьшиться из-за изменения термодинамических условий. Вероятно, снижение амплитуды химпика обусловлено не уменьшением, а увеличением начальной скорости реакции, в результате чего ВВ начинает реагировать непосредственно во фронте ударной волны. Это подтверждает также тот факт, что после ударного скачка скорость не уменьшается, как в чистом ТНМ (см. рис. 10), а продолжает возрастать, достигает максимума вблизи при  $t \approx 10$  нс и только затем спадает. То есть характер течения примерно аналогичен

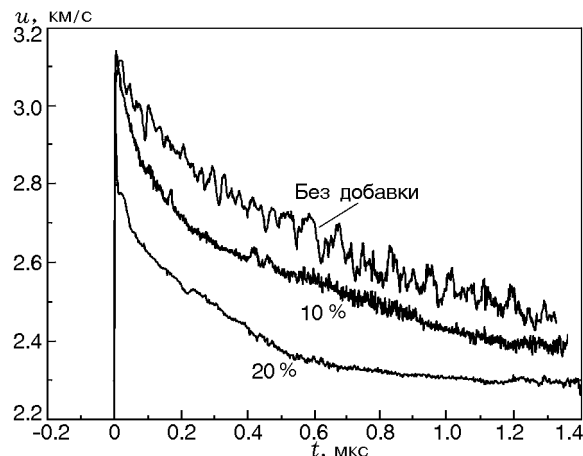


Рис. 11. Профили массовой скорости при детонации ФИФО и его смесей с 10 и 20 % нитробензола

течению при детонации смеси нитрометана с ДЭТА (см. рис. 8).

Неожиданный характер течения в зоне реакции, который также обусловлен реакцией во фронте, наблюдается и в мощном жидком взрывчатом веществе ФИФО [33, 37, 38]. В жидких ВВ с медленной кинетикой детонационные волны неустойчивы [39]. Следовало бы ожидать, что к ФИФО это не относится, поскольку его время реакции невелико,  $\approx 300$  нс [40]. Результат, однако, оказался иным. Профиль массовой скорости как в зоне химической реакции, так и в волне разгрузки является сильно осциллирующим с характерной амплитудой осцилляций около 50 м/с (верхний профиль на рис. 11). Отчетливо выраженный период колебаний отсутствует, но порядок величины примерно 50 нс. Это означает, что детонационный фронт неустойчив и размер неоднородностей сопоставим с толщиной 7-микронной фольги, т. е. порядка 10 мкм.

В отличие от тетранитрометана, ФИФО имеет отрицательный кислородный баланс, поэтому добавка любого инертного разбавителя снижает его детонационные параметры и уменьшает скорость реакции, что должно привести, согласно традиционным представлениям о структуре детонационных волн, к еще большему развитию неустойчивости. Вместо этого, при небольшой концентрации разбавителя наблюдается стабилизация течения. В качестве примера на рис. 11 приведены профили скорости, полученные при добавлении 10 и 20 % нитробензола, и, как видно, осцилля-

ции исчезают. Одновременно резко, примерно вдвое по сравнению с чистым ФИФО, увеличивается амплитуда химпика. Возрастает также градиент скорости в зоне реакции, причем наиболее резкое падение скорости происходит за первые 10 нс. Высокая начальная скорость реакции за ударным скачком приводит к устойчивости детонационной волны. Столь необычный характер изменения структуры зоны реакции обусловлен частичной реакцией ВВ непосредственно во фронте ударной волны. Причем в чистом ФИФО из-за высокой начальной скорости реакции доля разложения достаточно высока и максимальные давление и массовая скорость оказываются ниже значений, соответствующих пересечению прямой Михельсона с ударной адиабатой исходного ВВ. В зоне реакции (см. рис. 11) происходит лишь «догорание» с относительно невысокой скоростью. При добавлении нитробензола начальная скорость реакции, а следовательно, и количество прореагировавшего во фронте ВВ уменьшаются и быстрая стадия реакции перемещается в зону реакции, что приводит к относительному повышению параметров химпика в связи с приближением к ударной адиабате ВВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что неклассические режимы детонации не представляют собой исключительное явление. Они наблюдаются в экспериментах не только с прессованными (гетерогенными), но и с жидкими (гомогенными) ВВ. Как уже отмечалось, в рамках теории детонации ЗНД невозможно объяснить рост давления (массовой скорости) за ударным скачком с последующим формированием максимума. Тем более невероятным кажется существование стационарной детонационной волны без химпика. Тем не менее эти режимы наблюдаются и находят объяснение в моделях, учитывающих возможность реакции ВВ непосредственно во фронте ударной волны. При этом подходы, основанные на термодинамическом объяснении неклассических режимов детонации, не способны интерпретировать даже ту совокупность экспериментальных данных, которая имеется к настоящему времени. Например, достаточно искусственно выглядит объяснение существования интервала начальной плотности зарядов TNETB, внутри которого химпик отсутствует, а вне его регистрируется классическая детонационная волна с химпи-



ком, а также зависимость нижней границы этого интервала от дисперсности частиц ВВ, привлечением соображений о пересечении ударной и детонационной адиабат.

Особенно убедительным доказательством кинетической природы неклассических режимов детонации являются данные, полученные для смеси нитрометана с диэтиленetriамином. Данная смесь представляет собой уникальный объект исследования, позволяющий при неизменных термодинамических свойствах ВВ менять кинетику химической реакции и непосредственно наблюдать переход от классической структуры зоны реакции к неклассической.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Детонация. — М.: Изд-во Моск. мех. ин-та, 1952.
2. 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.
3. Уткин А. В. Влияние начальной плотности на структуру детонационных волн в гетерогенных ВВ // Химическая физика процессов горения и взрыва: 12-й Симпоз. по горению и взрыву. — Черноголовка: ИПХФ РАН, 2000. — Ч. II. — С. 168–170.
4. Уткин А. В., Першин С. В., Фортвов 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.
5. Уткин А. В., Колесников С. А., Фортвов В. Е. Структура стационарной детонационной волны в прессованном гексогене // Докл. АН. — 2001. — Т. 381, № 6. — С. 760–762.
6. Utkin A. V., Kolesnikov S. A., Pershin S. V., Fortov V. E. Influence of initial density on the reaction zone for steady-state detonation of high explosives // Proc. 12th Intern. Detonation Symp., San Diego, CA. — 2002. — P. 175–182.
7. 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.
8. Kolesnikov S. A., Utkin A. V., Ananin A. V., Pershin S. V., Fortov V. E. Reaction zone of steady-state detonation waves in dinitrodiazapentane and RDX // Proc. Shock Compression of Condensed Matter — 2003, Portland, OR. — AIP CP706. — 2003. — P. 851–854.
9. Уткин А. В., Ананьин А. В., Колесников С. А., Першин С. В. Структура детонационных волн в индивидуальных и смесевых прессованных ВВ // VII Харитоновские темат. науч. чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»: тр. — Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 10–14.
10. Kolesnikov S. A., Utkin A. V., Ananin A. V. Non-classical steady-state detonation regimes in TNETB // Proc. of 13th Intern. Detonation Symp., Norfolk, VA. — ONR 351-07-01. — 2006. — P. 422–426.
11. Utkin A. V., Mochalova V. M., Ananin A. V. Reaction zone structure for pressed HE and mixtures of high explosives with additions // Ibid. — P. 415–421.
12. Мочалова В. М., Уткин А. В., Ананьин А. В. Влияние дисперсности на структуру детонационной волны в прессованном TNETB // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 90–95.
13. Мочалова В. М., Уткин А. В., Ананьин А. В. Структура детонационных волн в прессованном 2',2',2'-тринитроэтил-4,4,4-тринитробутирате // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 12. — С. 8–12.
14. Hirschfelder J. O., Curtiss C. F. Theory of detonations. I. Irreversible unimolecular reaction // J. Chem. Phys. — 1958. — V. 28, N 6. — P. 1130–1147.
15. Linder B., Curtiss C. F., Hirschfelder J. O. Theory of detonations. II. Reversible unimolecular reaction // Ibid. — 1958. — V. 28, N 6. — P. 1147–1151.
16. Вильямс Ф. М. Теория горения. — М.: Наука, 1971.
17. Зельдович Я. Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика / под ред. Ю. Б. Харитона. — М.: Наука, 1984.
18. Ершов А. П. О макрокинетике быстрых реакций // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 6. — С. 49–59.
19. Ершов А. П. Режимы детонации твердых взрывчатых веществ при неклассической быстрой кинетике // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 77–87.
20. Кузьмицкий И. В. О зависимости пространственно-временной структуры зоны химической реакции от начальной плотности взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 106–111.
21. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
22. Burnside N. J., Son S. F., Asay B. W., Skidmore C. B. Particle characterization of pressed granular HMX // Shock Compression of Condensed Matter — 1997: Proc. — Woodbury, New York: AIP Press, 1998. — P. 571–574.
23. 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.

24. **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.
25. **Lubyatinsky S. N., Loboiko V. G.** Density effect on detonation reaction zone length in solid explosives // *Shock Compression of Condensed Matter* — 1997: Proc. — Woodbury, New York: AIP Press, 1998. — P. 743–746.
26. **Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н.** Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва.* — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
27. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Логвиненко А. А.** Влияние диэтилентриамина на структуру детонационных волн в нитрометане // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 107–113.
28. **Mochalova V., Utkin A.** The influence of small additions of diethylenetriamine on the detonation waves stability for nitromethane/acetone solution // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2014. — V. 500. — 052031.
29. **Колдунов С. А., Ананьин А. В., Торунов С. И., Уткин А. В.** Влияние диэтилентриамин на распространение детонации в нитрометане и его смесях с невзрывчатыми жидкостями // XV Харитоновские темат. науч. чтения: сб. докл. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 141–146.
30. **Воскобойников И. М., Афанасенков А. Н., Богомолов В. М.** Обобщенная ударная адиабата органических жидкостей // *Физика горения и взрыва.* — 1967. — Т. 3, № 4. — С. 585–593.
31. **Кондриков Б. Н.** Расчет термодинамических параметров ударно-сжатого нитрометана // *Физика горения и взрыва.* — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 116–122.
32. **Мочалова В. М., Уткин А. В., Гаранин В. А., Торунов С. И.** Исследование структуры детонационных волн в тетранитрометане и его смесях с метанолом // *Физика горения и взрыва.* — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 95–100.
33. **Mochalova V. M., Torunov S. I., Utkin A. V., Garanin V. A.** Detonation wave parameters in nitromethane/methanol and FEFO/nitrobenzene // 14th Intern. Detonation Symp., 2010, Coeur d'Alene, Idaho, USA. — Office of Naval Research, Arlington Virginia, ONR-351-10-185. — 2010. — P. 327–332.
34. **Mochalova V. M., Utkin A. V., Garanin V. A.** Investigation of detonation wave in tetranitromethane, nitromethane, and their solutions with methanol // *J. Energ. Mater.* — 2010. — V. 28, iss. S1. — P. 231–240.
35. **Зотов Е. В.** Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2004.
36. **Дубовик А. В., Боболев В. К.** Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. — М.: Наука, 1978.
37. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Гаранин В. А., Торунов С. И.** Параметры стационарных детонационных волн в растворе ФИФО/нитробензол // XI Харитоновские темат. науч. чтения: тр. / под ред. А. Л. Михайлова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 37–42.
38. **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.
39. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
40. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И.** Определение детонационных параметров жидких взрывчатых веществ // *Хим. физика.* — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 72–77.

*Поступила в редакцию 23/VI 2014 г.*