

УДК 534.222.2

ВЛИЯНИЕ ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА СТРУКТУРУ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В НИТРОМЕТАНЕ

А. В. Уткин, В. М. Мочалова, А. А. Логвиненко

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

Представлены результаты экспериментального исследования структуры зоны реакции при стационарной детонации нитрометана, сенсibilизированного диэтилентриамином (ДЭТА). Концентрация ДЭТА изменялась в диапазоне 0.0125 ÷ 15 %. Показано, что малые добавки ДЭТА приводят к качественному изменению характера течения в зоне реакции. После ударного скачка массовая скорость продолжает возрастать в течение примерно 10 нс, достигает максимума и только затем падает. При этом амплитуда химпика уменьшается на порядок. Отмеченные особенности объясняются разложением нитрометана, сенсibilизированного ДЭТА, во фронте ударной волны, что обусловлено резким увеличением начальной скорости реакции.

Ключевые слова: детонация, химпик, зона химической реакции, нитрометан, смесь нитрометан/диэтилентриамин.

Известно, что малые добавки аминов могут существенно влиять на детонационные свойства нитрометана CH_3NO_2 (НМ). Особенно ярко это проявляется в изменении критических параметров [1–4]. Молярная добавка амина в количестве 0.025 % (1 молекула амина на 4000 молекул нитрометана) уменьшает критический диаметр вдвое, добавка 2 % — в семь раз [1]. Значительно уменьшается также давление инициирования детонации ударными волнами. Добавка 2 % (по массе) диэтилентриамина $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2)_2\text{NH}$ (ДЭТА) снижает давление с 10 до 7.5 ГПа [3]. Считается, что малые концентрации аминов приводят к образованию активных частиц, которые увеличивают начальную скорость реакции. Но однозначное объяснение этого явления отсутствует. Авторы [4] считают, что реакция, инициируемая добавкой, имеет цепной характер: молекула добавки или полученная с ее помощью активная частица приводят к возникновению реакционной цепи. В качестве такой активной частицы в работах [2, 5] рассматривается анион аци-формы нитрометана $\text{CH}_2 = \text{NO}_2^-$, легко образующийся в присутствии аминов. Предполагается также возможность формирования молекулярного комплекса между НМ и амином, мономолекулярный распад которого и является

первой стадией автокаталитической реакции разложения нитрометана [6]. Авторы [7] на основе анализа спектров поглощения растворов НМ с различными аминами, полученных при ступенчатом ударно-волновом нагружении до 17 ГПа, пришли к выводу об определяющей роли радикала аниона нитрометана $\text{CH}_3\text{NO}_2^{\bullet-}$, у которого энергия диссоциации связи $\text{C}-\text{N}$ оказалась почти в пять раз ниже, чем в нейтральной молекуле НМ.

Естественно ожидать, что добавки аминов должны влиять не только на критический диаметр и давление инициирования детонации, но и на структуру стационарных детонационных волн. Эти исследования особенно интересны тем, что малые концентрации аминов, оказывая сильное влияние на кинетику разложения НМ, оставляют практически неизменными термодинамические свойства раствора. Поэтому появляется уникальная возможность, изменяя только кинетику реакции взрывчатого вещества (ВВ), в явном виде изучать ее влияние на характер течения в зоне реакции, на устойчивость детонационных волн, на возможность реакции гомогенных взрывчатых веществ непосредственно во фронте ударной волны. С этой целью в данной работе проведено экспериментальное исследование влияния малых добавок ДЭТА на структуру детонационных волн в нитрометане.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-03-01251-а).

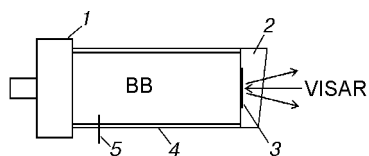


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — заряд тротила, 2 — водяное окно, 3 — алюминиевая фольга, 4 — полипропиленовая оболочка, 5 — ионизационный датчик

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов показана на рис. 1. В опытах использовались нитрометан начальной плотности 1.137 г/см^3 [8, 9] и ДЭТА плотностью 0.954 г/см^3 [10]. Смеси НМ/ДЭТА готовились непосредственно перед опытом. Заряд ВВ помещался в полипропиленовую оболочку с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина заряда составляла 150 мм. Инициирование детонации осуществлялось прессованным зарядом тротила. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной 7 мкм, расположенной между торцом заряда и водяным окном. Время циркуляции волн в такой фольге менее 2 нс, что не превышает временного разрешения интерферометра VISAR, который использовался для регистрации скорости. Поэтому экспериментальные данные представляют собой скорость движения границы ВВ/вода. Постоянная интерферометра равна 305 м/с, что позволяет определять скорость с точностью $\pm 10 \text{ м/с}$. С использованием ионизационного датчика в каждом опыте измерялась скорость детонации D . Второй меткой времени являлся сигнал интерферометра, регистрирующий выход детонационной волны на границу с окном. Точность определения скорости детонации была не хуже $\pm 0.2 \%$, что составляет $\pm 0.01 \text{ км/с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов приведены на рис. 2–5 и представлены в таблице. При расчете массовой скорости u_{CJ} и давления p_{CJ} в точке Чепмена — Жуге предполагалось, что время реакции в смеси, как и в чистом НМ, равно 50 нс [11–14]. Погрешность определения u_{CJ} и p_{CJ} составляет $\pm 0.05 \text{ км/с}$ и $\pm 0.4 \text{ ГПа}$ соответственно. Массовая концентрация ДЭТА изменялась в интервале $0.0125 \div 15.0 \%$, для каждой

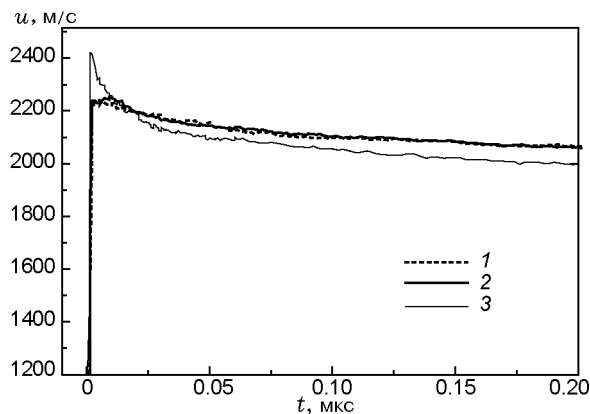


Рис. 2. Профили массовой скорости для чистого НМ (линия 3) и смеси НМ/ДЭТА 99.75/0.25 (линии 1, 2) на границе с водой

концентрации было проведено от 2 до 10 опытов. При фиксированном составе смеси профили массовой скорости хорошо воспроизводятся, что демонстрирует рис. 2, на котором приведены данные двух одинаковых опытов (зависимости 1, 2) для смеси, содержащей 0.25 % ДЭТА. Из рис. 2 видно, что течение в смеси имеет яркие отличия от течения в чистом нитрометане (зависимость 3). Во-первых, резко изменяется характер зависимости скорости от времени в зоне реакции. В чистом нитрометане за ударным скачком скорость монотонно уменьшается и в зоне реакции формируется химпик. Причем, как видно из рис. 2, максимальный градиент скорости реализуется непосредственно за фронтом ударной волны. Именно таким и должно быть течение согласно классической теории детонации [15]. Однако 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. Действительно, на рис. 2 представлены профили скорости границы ВВ/вода. Анализируя течение в плоскости p – u , для чистого нитрометана находим, что скорость в химпике Неймана $u_N = 2.60 \text{ км/с}$, а в точке Чепмена — Жуге $u_{CJ} = 1.80 \text{ км/с}$ [12–14], т. е. амплитуда химпика $\Delta u_N = u_N - u_{CJ}$ равна 0.80 км/с . Подробно течение в плоскости p – u с учетом циркуляции волн в алюминиевой фольге рассмотрено в

[16, 17], где показано, что точность определения скорости в химпике ± 0.1 км/с, а в точке Чепмена — Жуге точность равна ± 0.05 км/с. В данном случае погрешности обусловлены не только приближенным видом ударной адиабаты ВВ, но и разрешением методики и неопределенным положением точки Чепмена — Жуге.

Аналогичный расчет для смеси НМ/ДЭТА 99.75/0.25 с учетом того, что измеренная скорость детонации равна $D = 6.29$ км/с, а начальная плотность осталась практически той же, дает следующие величины: $u_N = 1.97$ км/с, $u_{CJ} = 1.87$ км/с, $\Delta u_N = 0.10$ км/с. Причем данное значение амплитуды химпика является оценкой сверху, поскольку, как сказано выше, при определении положения точки Чепмена — Жуге предполагалось, что время реакции не изменилось и равно 50 нс, тогда как добавка сенсibilизатора может его уменьшить. 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 ≈ 0.4 ГПа.

Влияние концентрации ДЭТА на структуру детонационной волны иллюстрируют рис. 3, 4. На рис. 3 приведены данные экспериментов при концентрациях, не превышающих 1.0 %. Все качественные и количественные особенности, отмеченные для смеси НМ/ДЭТА 99.75/0.25, имеют место во всем интервале концентраций. Удивительным является тот факт, что при изменении содержания ДЭТА на два порядка, от 0.025 до 1.0 %, профили скорости остаются практически неизменными. Только при уменьшении концентрации до 0.0125 % амплитуда химпика начинает увеличиваться (см. рис. 3,а), оставаясь, тем не менее, в несколько раз меньше, чем в чистом НМ. Это означает, что воздействие ДЭТА на структуру детонационной волны имеет пороговый характер и значение пороговой концентрации составляет примерно 0.02 %.

Дальнейшее увеличение концентрации ведет к снижению параметров Чепмена — Жуге (см. рис. 4), и при 2 % ДЭТА детонационные параметры смеси такие же, как и в чистом НМ. Причем максимальное значение скорости в химпике u_N практически не изменяется при увеличении количества ДЭТА до 5 %. Последнее утверждение справедливо только для скорости, поскольку давление из-за уменьшения

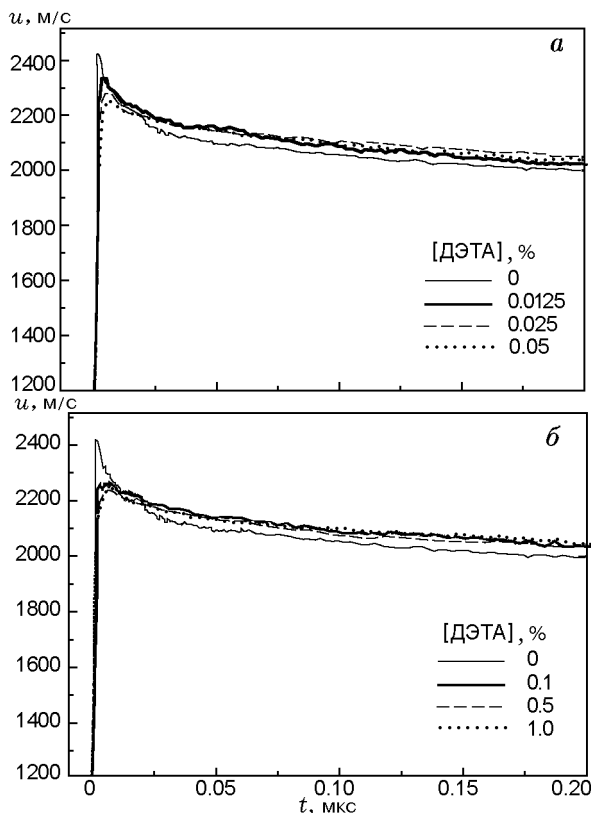


Рис. 3. Профили массовой скорости на границе ВВ/вода при различных концентрациях ДЭТА в смеси с НМ

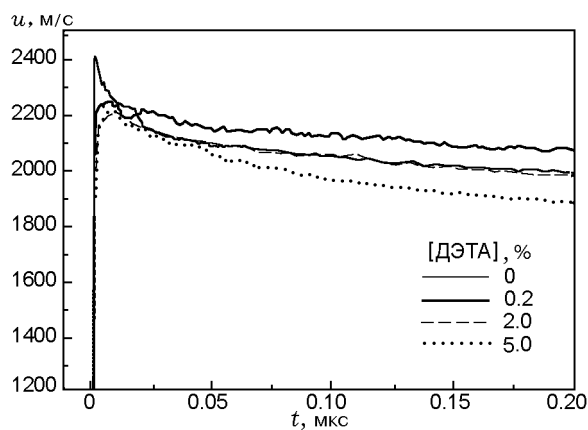


Рис. 4. Профили массовой скорости для смесей НМ/ДЭТА при различных концентрациях ДЭТА

скорости детонации смеси при 5 % начинает снижаться (см. таблицу). Уменьшение детонационных параметров смеси вполне естественно и отражает тот факт, что ДЭТА увеличивает скорость химической реакции, но с термодина-

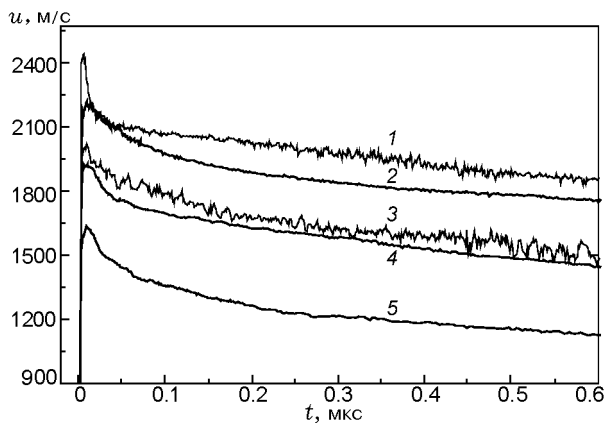


Рис. 5. Профили массовой скорости для смесей НМ/метанол (1 — 95/5, 3 — 90/10) и НМ/ДЭТА (2 — 95/5, 4 — 90/10, 5 — 85/15)

Параметры детонации смеси НМ/ДЭТА

НМ/ДЭТА	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$u_{сж}$, км/с	$p_{сж}$, ГПа
100/0	1.137	6.27	1.82	13.0
99.9875/0.0125	1.137	6.36	1.88	13.6
99.975/0.025	1.137	6.36	1.88	13.6
99.95/0.05	1.137	6.36	1.88	13.6
99.9/0.1	1.137	6.35	1.88	13.6
99.8/0.2	1.137	6.35	1.87	13.4
99.75/0.25	1.136	6.29	1.87	13.4
99.5/0.5	1.136	6.29	1.87	13.3
99/1	1.135	6.28	1.87	13.3
98/2	1.133	6.28	1.83	13.0
95/5	1.126	6.22	1.81	12.6
90/10	1.116	6.19	1.48	10.2
85/15	1.105	6.10	1.17	7.9

мической точки зрения является «инертным» разбавителем.

Особенно явно влияние уменьшения теплоты взрыва смеси в результате разбавления НМ «инертным» веществом обнаруживается при 10 и 15 % ДЭТА (зависимости 4 и 5 на рис. 5). При этих концентрациях заметно снижаются параметры в химпике и в точке Чепмена — Жуге, но тем не менее сенсibiliзирующие свойства ДЭТА продолжают проявляться достаточно отчетливо. Это выражается, в частности, в характере течения в окрест-

ности химпика, максимум которого, как и при малых концентрациях ДЭТА, достигается примерно через 10 нс после ударного скачка. Но наибольший интерес представляет влияние кинетики на устойчивость детонационных волн. Вопрос об устойчивости детонационной волны в нитрометане следует считать открытым. В работе [8] по характеру отражения света от детонационного фронта сделан вывод о том, что он является не гладким, а пульсирующим. Однако возможно существование и других причин, влияющих на отражающие характеристики фронта, поэтому данное наблюдение не является прямым доказательством его неустойчивости. Исследования по регистрации профилей скорости на границе с водой, проведенные нами здесь и в других работах [12–14], показывают, что детонационный фронт либо устойчив, либо амплитуда пульсаций не превышает 1 мкм и они полностью затухают при прохождении волны по 7-микронной фольге, отражающей зондирующее излучение (см. рис. 2). Тем не менее, не вызывает сомнения факт потери устойчивости детонационного фронта при разбавлении нитрометана инертными разбавителями, в частности метанолом [12, 13]. На рис. 5 приведены профили скорости для смесей нитрометана с метанолом (зависимости 1, 3) и с ДЭТА (зависимости 2, 4, 5) при концентрациях 5, 10 и 15 %. Для смесей с метанолом на зависимостях отчетливо выражены мелкомасштабные осцилляции, обусловленные неустойчивостью детонационных волн, тогда как в смесях с ДЭТА профили скорости гладкие, что свидетельствует об устойчивости детонационного фронта. Причем он остается устойчивым при увеличении концентрации ДЭТА до 15 %.

Необходимо подчеркнуть, что речь идет о зарядах, диаметр которых заметно превышает критический. Известно, что уменьшение диаметра зарядов нитрометана приводит к потере устойчивости фронта и формированию волн прекращения реакции [8]. При использовании полипропиленовых оболочек неустойчивость течения наблюдается при диаметре заряда 20 мм [16]. Оказывается, стабилизация течения малыми добавками аминов наблюдается и в этом случае. Авторы [1] показали, что в стеклянной оболочке, диаметр которой на $0.5 \div 1$ мм больше критического, неоднородность свечения фронта исчезает полностью при добавлении в нитрометан 0.1 % диэтиламина.

Наряду с профилями массовой скорости,

во всех опытах измерялась скорость детонации D . На зависимости D от концентрации ДЭТА можно выделить два интервала, в каждом из которых скорость детонации постоянна. Первый интервал соответствует изменению концентрации от 0.0125 до 0.2 % и характеризуется увеличением D по отношению к значению в НМ почти на 1.5 % (см. таблицу), что заметно превышает погрешность измерений. Увеличение скорости детонации обусловлено, вероятно, уменьшением критического диаметра и вследствие этого более полным превращением НМ в зоне реакции при фиксированном диаметре заряда. Во втором интервале, на котором концентрация меняется от 0.25 до 2 %, скорость детонации также постоянна и практически совпадает со значением в чистом НМ. При этом она меньше, чем при концентрациях ДЭТА $0 \div 0.25$ %. Причем скорость падает достаточно резко, и это приводит к тому, что в диапазоне ДЭТА $0.1 \div 0.2$ % воспроизводимость скорости детонации ухудшается. Например, при концентрации ДЭТА 0.1 % в трех из шести проведенных опытов $D = 6.32$ км/с, а в трех других — $D = 6.38$ км/с. Подобный разброс скоростей детонации от опыта к опыту наблюдался при исследовании детонации некоторых смесей жидких ВВ с разбавителями и в других работах [18].

Снижение скорости детонации во втором интервале концентраций объясняется, вероятно, тем, что выигрыш в энергосодержании за счет увеличения глубины превращения НМ в смеси с ДЭТА полностью компенсируется уменьшением теплоты взрыва смеси. Дальнейшее увеличение концентрации ДЭТА приводит к снижению всех параметров в точке Чепмена — Жуге, что хорошо видно из таблицы, т. е. начинает явно проявляться уменьшение теплоты взрыва смеси вследствие разбавления ВВ «инертным» веществом.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований обнаружено сильное влияние диэтилентриаминна на структуру зоны реакции в смеси с нитрометаном, вызванное резким увеличением начальной скорости реакции ВВ даже при малых, составляющих сотые доли процента, концентрациях ДЭТА. В рамках классической модели детонации невозможно объяснить характер тех качественных изменений течения за ударным

скачком, которые наблюдались в экспериментах. В данном случае необходимо учитывать возможность разложения ВВ непосредственно во фронте ударной волны.

Подтверждением этому служат результаты анализа течения в плоскости давление — удельный объем. На рис. 6 приведена ударная адиабата нитрометана, соответствующая обобщенной ударной адиабате органических жидкостей [19] (зависимость 1): $D = 1.2c_0 + 1.7u$, где $c_0 = 1.34$ км/с — скорость звука при нормальных условиях [20, 21]. 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. реакция во фронте не идет. Темным кружком показаны параметры Чепмена — Жуге для чистого нитрометана. Светлым треугольником обозначено давление 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, когда учитываются эффекты переноса в среде, не выпол-

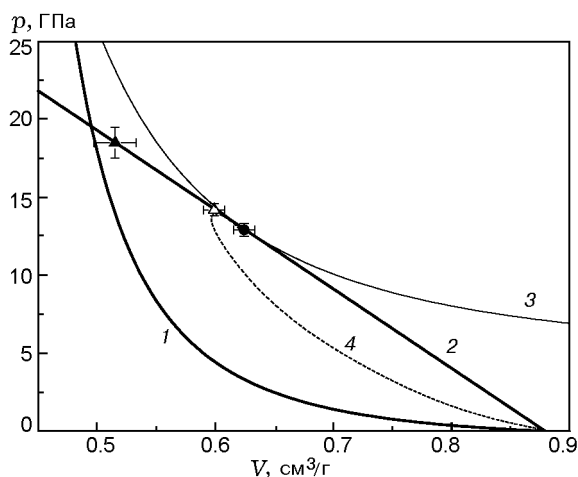


Рис. 6. Параметры химпика (темный треугольник) для чистого нитрометана и смеси НМ/ДЭТА 0.975/0.025 (светлый треугольник)

няется. Зависимость 4 на рис. 7 отражает качественный характер фазовой траектории, нижняя ветвь которой соответствует движению во фронте, а верхняя — в спадающей части химпика [22]. Реакцией во фронте объясняется, таким образом, уменьшение амплитуды химпика. Этому же способствует и небольшое увеличение параметров Чепмена — Жуге при концентрациях ДЭТА, не превышающих 1 %.

В рамках классической теории детонации невозможно также объяснить влияние ДЭТА на устойчивость детонационной волны. Например, из сопоставления профилей скорости на рис. 2 следует, что абсолютные значения градиентов скорости в зоне реакции для смеси резко уменьшаются по сравнению с их величиной для чистого НМ. Снижение градиента массовой скорости за фронтом ударной волны, согласно классическим представлениям, связано с уменьшением скорости реакции, тогда как ДЭТА, наоборот, увеличивает скорость разложения. Кроме того, 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. Эти внутренние противоречия устраняются, если предположить протекание реакции во фронте. В этом случае традиционный подход к исследованию устойчивости детонационных волн неприемлем, поскольку необходимо рассматривать течение во фронте волны.

В заключение отметим, что использованное в данной работе предположение о том, что характерное время реакции не зависит от концентрации ДЭТА и равно 50 нс может показаться необоснованным и противоречащим очевидным экспериментальным фактам. Сильное влияние аминов на критический диаметр [1], казалось бы, однозначно свидетельствует и об аналогичном влиянии на время реакции. И это действительно так, если детонация остается устойчивой при всех диаметрах заряда, вплоть до критического. Но, как уже отмечалось, к нитрометану это не имеет отношения, поскольку при уменьшении диаметра заряда детонационная волна сначала теряет устойчивость и только затем достигается критический диаметр, который соответствует, таким образом, неустойчивой, пульсирующей детонации. В этом случае, как показано в работе [8], «критический диаметр определяется не временем

реакции в детонационной волне, а много большим временем индукции за ударным фронтом, примыкающим к затухающему детонационному фронту». Именно этим объясняется аномально большое значение критического диаметра заряда нитрометана (по разным работам от 12 до 20 мм в зависимости от материала оболочки). Период индукции определяется начальной скоростью реакции, которая, в свою очередь, чрезвычайно чувствительна к концентрации ДЭТА, тогда как характерное время реакции в детонационной волне задается наиболее медленными реакциями, на которые амины могут не оказывать столь сильного влияния. Но если все-таки допустить, что время реакции заметно сокращается, например до 10 нс при малых концентрациях ДЭТА (менее 1 %), то из полученных результатов следует, что химпик вообще исчезает и реакция полностью проходит в фазе сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кондриков Б. Н., Козак Г. Д., Райкова В. М., Старшинов А. В.** О детонации нитрометана // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 233, № 3. — С. 402–405.
2. **Engelke R.** Effect of a chemical inhomogeneity on steady-state detonation velocity // Phys. Fluids. — 1980. — V. 23. — P. 785–880.
3. **Sheffield S. F., Dattelbaum D. M., Engelke R., Alcon R. A., Crouzet B., Robbins D. L., Stahl D. B., Gustavsen R. L.** Homogeneous shock initiation process in neat and chemically sensitized nitromethane // Proc. 13th Intern. Detonation Symp., Norfolk, Virginia, USA, 2006. — P. 401–407.
4. **Старшинов А. В., Кондриков Б. Н., Козак Г. Д., Райкова В. М.** Гомогенный катализ при детонации нитрометана // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977. — С. 73–76.
5. **Engelke R., Schiferl D., Storm C. B., Earl W. L.** Production of the nitromethane aci ion by static high pressure // J. Phys. Chem. — 1988. — V. 92. — P. 6815–6819.
6. **Constantinou C. P., Winey J. M., Gupta Y. M.** UV/Visible absorption spectra of shocked nitromethane-amine mixtures up to a pressure of 14 GPa // J. Phys. Chem. — 1994. — V. 98. — P. 7767–7776.
7. **Gruzdov Y. A., Gupta Y. M.** Mechanism of amine sensitization in shocked nitromethane // J. Phys. Chem. A. — 1998. — V. 102, № 13. — P. 2322–2331.

8. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
9. **Гареев Г. А., Свирская Л. Г.** Химия нитрометана. — Новосибирск: Наука, 1995.
10. **Химическая энциклопедия.** Т. 2 / гл. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Сов. энцикл., 1990.
11. **Sheffield S. A., Engelke R., Alcon R. R., et al.** Particle velocity measurements of the reaction zone in nitromethane // Proc. 12th Detonation Symp., San Diego, California, USA, 2002. — P. 159–166.
12. **Mochalova V. M., Torunov S. I., Utkin A. V., Garanin V. A.** Detonation wave parameters in nitromethane/methanol and FEFO/nitrobenzene // Proc. 14th Intern. Detonation Symp., Coeur d'Alene, Idaho, USA, 2010. — P. 327–332.
13. **Mochalova V. M., Utkin A. V., Garanin V. A.** Investigation of detonation wave in tetranitromethane, nitromethane, and their solutions with methanol // J. Energet. Materials. — 2010. — V. 28, is. S1. — P. 231–240.
14. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Гаранин В. А.** Влияние диаметра заряда на детонационные параметры жидких ВВ // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 72–77.
15. **Зельдович Я. Б., Компанец А. С.** Детонация. — М.: Изд-во Моск. мех. ин-та, 1952.
16. **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.
17. **Мочалова В. М.** Исследование структуры детонационных волн в жидких взрывчатых веществах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Черноголовка, 2011.
18. **Зотов Е. В.** Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ / под ред. А. Л. Михайлова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004.
19. **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.
20. **Lysne P. C., Hardesty D. R.** Fundamental equation of state of liquid nitromethane to 100 kbar // J. Chem. Phys. — 1973. — V. 59, N 12. — P. 6512–6523.
21. **Кондриков Б. Н.** Расчет термодинамических параметров ударно-сжатого нитрометана // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 116–122.
22. **Вильямс Ф. М.** Теория горения. — М.: Наука, 1971.

*Поступила в редакцию 28/IV 2012 г.,
в окончательном варианте — 19/VI 2012 г.*
