

УДК 534.222.2

СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В СМЕСЯХ НИТРОМЕТАНА С ИНЕРТНЫМИ РАЗБАВИТЕЛЯМИ

В. М. Мочалова^{1,2}, А. В. Уткин^{1,2}

¹Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru

²Томский государственный университет, 634050 Томск

С использованием лазерного интерферометра VISAR измерены профили массовой скорости в детонационных волнах в смесях нитрометана с ацетоном и метанолом с добавкой сенсibilизатора диэтилентриамин. Показано, что даже малые, порядка 1 %, концентрации инертных разбавителей ацетона и метанола приводят к потере устойчивости одномерного детонационного фронта в нитрометане. Из результатов экспериментов следует, что сенсibilизатор является эффективным методом стабилизации течения, причем, если концентрация инертного разбавителя не превышает 10 %, детонационный фронт становится устойчивым при добавлении 1 % диэтилентриамин. При более высокой концентрации разбавителя сенсibilизатор не подавляет неустойчивость, однако в несколько раз уменьшает амплитуду осцилляций. Обнаружено увеличение скорости детонации при добавлении в смесь диэтилентриамин.

Ключевые слова: детонация, неустойчивость детонационного фронта, стабилизация детонационных волн, нитрометан, диэтилентриамин, смесь нитрометан/диэтилентриамин, нитрометан/ацетон, нитрометан/метанол.

DOI 10.15372/FGV20160215

ВВЕДЕНИЕ

Детонационные волны в гомогенных взрывчатых веществах (ВВ) при определенной кинетике химической реакции могут быть неустойчивыми [1–3]. Причем в жидких ВВ следует различать потерю устойчивости одномерного течения, реализующегося в отсутствие влияния границ, и неустойчивость на краю заряда.

При изучении неустойчивости первого типа обычно рассматривается простейшая структура детонационной волны, в которой исходное ВВ в течение времени, равного периоду индукции, не реагирует за ударным скачком, а затем мгновенно переходит в конечное состояние [1, 4, 5]. Такое течение оказывается неустойчивым по отношению к малым возмущениям, если отношение энергии активации к температуре за ударным скачком превышает критическое значение. При этом характерная длина волны возмущений пропорциональна ширине зоны химической реакции. В результате данного вида неустойчивости формируется ячеистая структура детонационного фронта.

Неустойчивость неоднородного течения второго типа, возникающая в детонационной волне на краю заряда [6], проявляется в формировании квазипериодического процесса, включающего в себя прекращение реакции, вызванное волнами разрежения, накопление нереагирующего слоя вещества и его последующую вспышку. Явление прекращения реакции на краю заряда, названное волнами срыва реакции, принципиально меняет физическую природу критического диаметра [6].

Цель данной работы — экспериментальное исследование возможности стабилизации неустойчивости первого типа (ячеистой структуры детонационной волны) в смесях нитрометана (НМ) с ацетоном (А) и метанолом (М) добавками сенсibilизатора диэтилентриамин ($(\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}_2\text{NH}_2)_2\text{NH}$ (ДЭТА)). Известно, что в чистом НМ одномерный детонационный фронт устойчив [7], тогда как добавки ацетона [6] и метанола [7] приводят к потере устойчивости и формированию ячеистой структуры. В работе [8] показано, что малые добавки ДЭТА увеличивают начальную скорость реакции нитрометана, которая оказывает определяющее влияние на устойчивость одномерного течения в детонационной волне. Поэтому можно ожидать стабилизирующего воздействия ДЭТА на дето-

Работа выполнена при поддержке Росатома (государственный контракт Н.4х.44.90.13.1112 от 20.05.2013).

© Мочалова В. М., Уткин А. В., 2016.

нацию в смесях НМ/А и НМ/М, по крайней мере при определенных концентрациях инертных разбавителей.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов показана на вставке рис. 1. Заряд ВВ помещался в полипропиленовую либо стальную оболочку с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина заряда 150 мм. Иницирование детонации осуществлялось прессованным зарядом тротила. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной $7 \div 400$ мкм, расположенной между торцом заряда и водяным окном. Профиль массовой скорости регистрировался лазерным интерферометром VISAR на границе фольга/окно. В каждом опыте для измерения скорости детонации D первую метку времени давал ионизационный датчик, второй меткой являлся сигнал интерферометра, регистрирующий выход детонационной волны на границу с окном. Погрешность определения скорости детонации была не больше ± 0.3 %.

Смеси ВВ готовили непосредственно перед опытом. Начальная плотность и показатель преломления НМ при 20°C составляли 1.137 г/см^3 и 1.3816 соответственно. На рис. 1

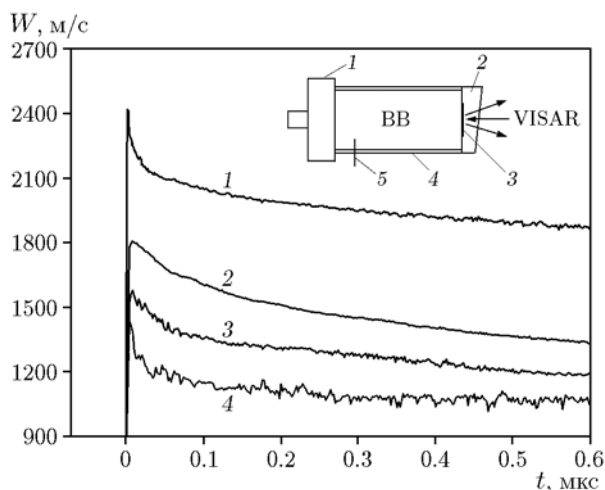


Рис. 1. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно в чистом НМ (1) и смесях НМ/ДЭТА состава 80/20 (2), 70/30 (3), 60/40 (4) (полиэтиленовая оболочка):

на врезке схема эксперимента: 1 — плосковолновый генератор, 2 — окно, 3 — фольга (Al), 4 — оболочка заряда, 5 — ионизационный датчик

приведены характерные профили массовой скорости на границе ВВ с водой при толщине алюминиевой фольги 7 мкм. Профиль 1 представляет данные для чистого НМ. После ударного скачка регистрируется резкий спад скорости, обусловленный формированием химпика в зоне реакции длительностью 50 нс [7], плавно переходящий в волну разгрузки. Как отмечалось ранее [7], зависимость скорости от времени является гладкой, без каких-либо осцилляций, которые можно было бы связать с формированием ячеистой структуры детонационного фронта. Это означает, что одномерная детонационная волна в НМ устойчива.

Добавление ДЭТА существенно изменяет течение в зоне реакции [8], причем детонационная волна остается устойчивой вплоть до количества добавки 20 % (масс.) (профиль 2 на рис. 1). Амины ускоряют химическую реакцию, но с позиции термодинамики они являются «инертными» разбавителями, поэтому увеличение концентрации приводит к снижению детонационных параметров и в результате к потере устойчивости, что вызывает осцилляции на профилях скорости. Признаки неустойчивости начинают проявляться в смеси НМ/ДЭТА с массовым соотношением компонентов 70/30 (профиль 3 на рис. 1). Дальнейшее увеличение количества ДЭТА (40 %) приводит к росту амплитуды осцилляций (профиль 4). Поскольку неоднородности фронта не сгладились после прохождения ударной волны по 7-микронной алюминиевой фольге, это означает, что их амплитуда порядка толщины фольги. Критическая массовая концентрация ДЭТА, при превышении которой смесь не детонирует, равна 60 %. Используемая методика регистрации позволяет, таким образом, получить достоверную информацию об устойчивости одномерной детонации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нитрометан/ацетон

Ситуация меняется принципиально при разбавлении НМ инертными разбавителями. Как правило, достаточно около 1 % разбавителя для потери устойчивости детонационного фронта. На рис. 2 профиль скорости 1 получен при концентрации ацетона 0.5 %. Видно появление мелкомасштабных осцилляций, связанных с потерей устойчивости течения в де-

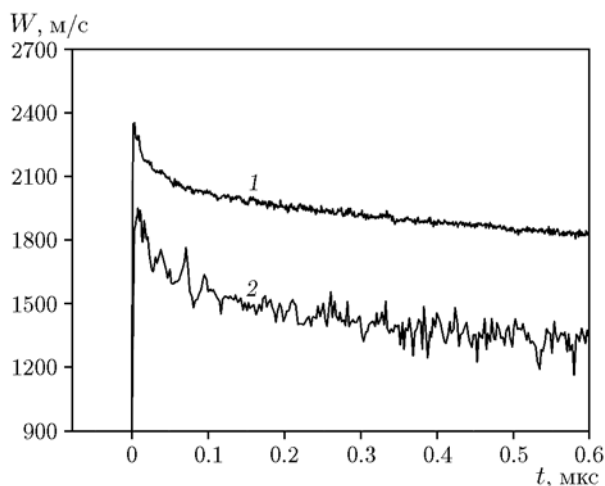


Рис. 2. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно в смесях НМ/А 99.5/0.5 (1) и НМ/А 90/10 + 0.1 % ДЭТА (2) (полипропиленовая оболочка)

тонационной волне. Одновременно с развитием неустойчивости увеличивается критический диаметр детонации. В результате смесь НМ/А 90/10 в полипропиленовой оболочке с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 2 мм не детонирует. Добавление 0.1 % ДЭТА уменьшает критический диаметр и делает возможным распространение детонационной волны в полипропиленовой оболочке. При этом профиль скорости оказывается сильно осциллирующим (профиль 2 на рис. 2). Это означает, что малые концентрации сенсibilизатора, хотя и уменьшают критический диаметр детонации смеси НМ/А 90/10, тем не менее не способны подавить неустойчивость детонационного фронта.

В оболочке, динамическая жесткость которой выше, чем у жидкого ВВ, критический диаметр уменьшается. Поэтому замена полипропиленовой оболочки на стальную того же диаметра приводит к формированию детонационной волны в смеси НМ/А 90/10. Результат эксперимента представлен на рис. 3 профилем 1. Возмущения детонационного фронта не затухают при прохождении ударной волны по 7-микронной алюминиевой фольге. Это означает, что амплитуда неоднородностей сопоставима с толщиной фольги, т. е. порядка 10 мкм. Отметим, что она остается малой по сравнению с зоной химической реакции, ширина которой превышает 400 мкм. При добавлении 0.5 % ДЭТА амплитуда осцилляций на профиле заметно уменьшается (профиль 2 на

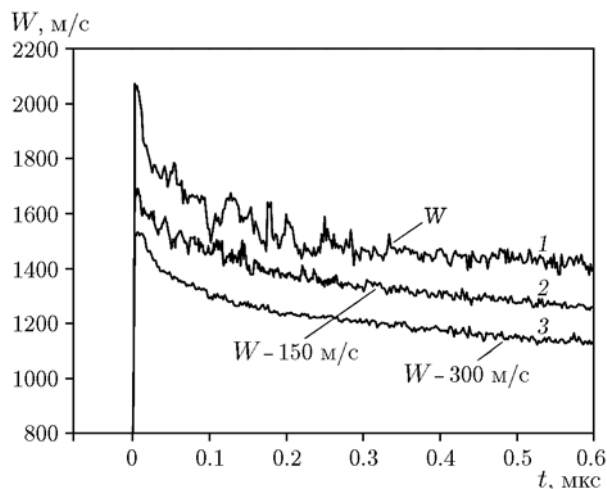


Рис. 3. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно в смеси НМ/А 90/10 (1) и при добавлении в нее 0.5 % ДЭТА (2) и 1 % ДЭТА (3) (стальная оболочка)

рис. 3), а при концентрации 1 % ДЭТА профиль скорости становится гладким (профиль 3), т. е. детонационный фронт смеси стабилизируется. Поскольку все три профиля скорости W на рис. 3 накладываются друг на друга, для наглядности два из них сдвинуты по вертикали вниз на 150 и 300 м/с для смесей с концентрацией ДЭТА 0.5 и 1 % соответственно. Таким образом, добавка 1 % ДЭТА к смеси нитрометан/ацетон 90/10 приводит к подавлению неустойчивости детонационного фронта.

Амплитуда и поперечный размер пульсаций детонационного фронта в смеси НМ/А резко возрастают с увеличением концентрации ацетона. В работе [9] приведены результаты исследования неустойчивости в смеси состава 80/20. Размер неоднородностей определялся двумя способами: лазерным интерферометром VISAR (в продольном направлении) и фотокамерой CORDIN (поперечный размер). Продольный размер неоднородностей оказался равным ≈ 50 мкм, поперечный — примерно 500 мкм. При такой амплитуде пульсаций практически невозможно получить воспроизводимые результаты в случае использования 7-микронной алюминиевой фольги для отражения лазерного луча. Увеличение толщины фольги до 50 мкм дает частичное сглаживание осцилляций скорости, особенно их высокочастотной составляющей, и улучшает воспроизводимость результатов. Однако, как видно на рис. 4 (профиль 1), даже при такой толщине

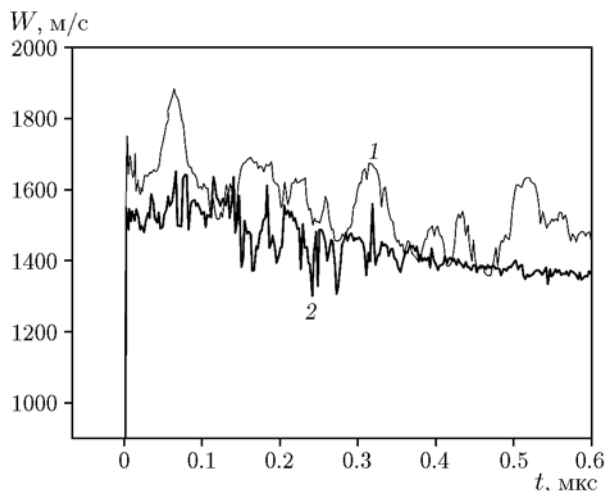


Рис. 4. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно:

1 — НМ/А 80/20, толщина алюминиевой фольги 50 мкм; 2 — НМ/А 80/20 + 10 % ДЭТА, толщина алюминиевой фольги 7 мкм; стальная оболочка

фольги колебания скорости настолько значительны, что не позволяют сказать ничего определенного о характере изменения осредненных параметров детонационной волны.

Попытка стабилизации детонационного фронта в смеси НМ/А 80/20 добавками ДЭТА приводит к уменьшению размера неоднородностей, что демонстрирует профиль 2 на рис. 4, полученный при добавлении 10 % ДЭТА. Причем в данном опыте использовалась 7-микронная алюминиевая фольга. Полученные результаты позволяют утверждать, что амплитуда осцилляций уменьшилась до значений порядка 10 мкм, т. е. примерно в пять раз по сравнению с тем, что имеет место в отсутствие стабилизатора. Тем не менее стабилизировать неустойчивость детонационной волны в смеси НМ/А 80/20 с помощью добавок ДЭТА не удастся. Даже при увеличении концентрации стабилизатора до 20 % осцилляции на профиле скорости сохраняются, хотя их амплитуда и уменьшается в несколько раз по сравнению с профилем 2 на рис. 4.

Нитрометан/метанол

Физические свойства метанола и ацетона, в наибольшей степени влияющие на ударно-волновые свойства смесей, очень близки. Например, их плотности и скорости звука практически совпадают и при 20 °С равны 0.790 и 0.791 г/см³, 1 122 и 1 190 м/с соответственно

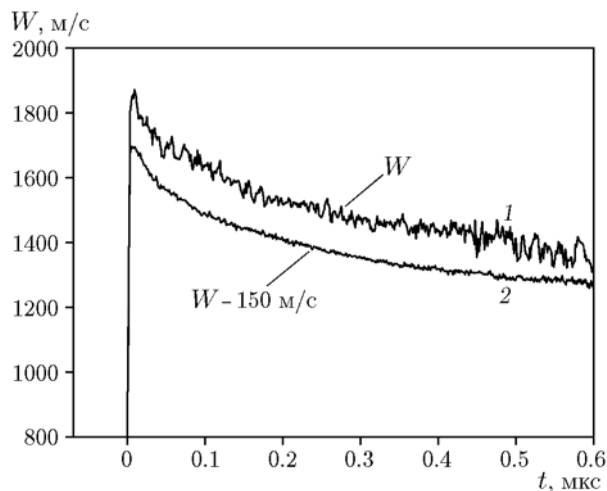


Рис. 5. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно в смесях НМ/М 90/10 и НМ/М 90/10 + 1 % ДЭТА (полипропиленовая оболочка)

[10, 11]. Тем не менее предельные концентрации детонации смесей НМ/А и НМ/М различаются существенно: 27 [6] и 40 % [7, 12] соответственно. Поэтому можно ожидать и различия в характере развития в них неустойчивости детонационных волн.

Результаты экспериментов для смеси НМ/М 90/10 приведены на рис. 5 (профиль 1). Как и в случае с ацетоном той же концентрации, детонационный фронт неустойчив, но следует отметить две характерные особенности. Во-первых, амплитуда осцилляций скорости заметно меньше, чем в смеси НМ/А (см. рис. 2, 3). Во-вторых, детонационная волна распространяется в полипропиленовой оболочке диаметром 36 мм, тогда как в смеси с ацетоном этот диаметр меньше критического. Вероятно, отмеченные особенности обусловлены теми же факторами, которые вызывают различие критических концентраций детонации смесей НМ/А и НМ/М. Тем не менее, так же как и в случае с ацетоном, добавка 1 % ДЭТА стабилизирует детонационный фронт (профиль 2 на рис. 5).

При увеличении концентрации метанола до 20 % амплитуда осцилляций скорости резко возрастает, но при этом, в отличие от ацетона, результаты воспроизводятся даже при использовании 7-микронной алюминиевой фольги (профиль 1 на рис. 6). Добавка 10 % ДЭТА практически стабилизирует течение в волне разгрузки при временах, превышающих 0.1 мс

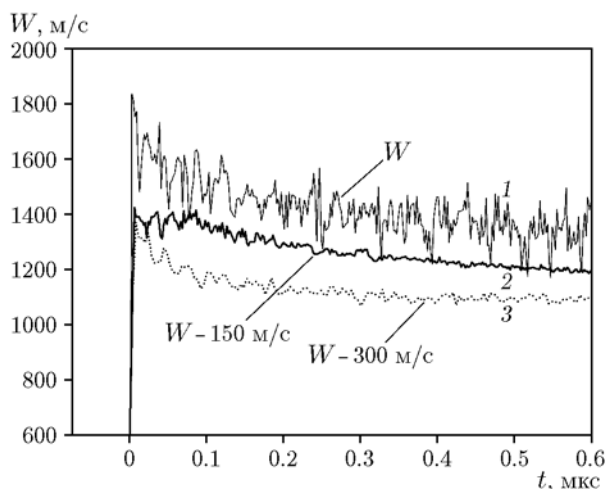


Рис. 6. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно в смеси НМ/М 80/20 (1) и при добавлении в нее 10 % ДЭТА (2) и 20 % ДЭТА (3) (стальная оболочка)

(профиль 2 на рис. 6). Однако в зоне реакции при малых временах неустойчивость по-прежнему сохраняется и вместо химпика регистрируется область осциллирующих параметров. Неустойчивость детонационной волны сохраняется и при добавлении 20 % ДЭТА, но характер течения заметно меняется: амплитуда осцилляций в зоне реакции уменьшается и на осредненном профиле скорости отчетливо наблюдается химпик (профиль 3 на рис. 6).

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ

В каждом опыте в исследуемых смесях измерялась скорость детонации. На рис. 7 показана зависимость скорости детонации от концентрации НМ α в смеси НМ/А + ДЭТА. Сплошная прямая представляет собой аппроксимацию этой зависимости для смеси НМ/А из работы [6]: $D = 2.55 + 3.7\alpha$. Результаты, полученные в данной работе (светлые точки), хорошо согласуются с данными [6]. Темными точками представлена скорость детонации в смеси НМ/А + ДЭТА, цифры около них — значения массовой концентрации ДЭТА по отношению к смеси НМ/А. Примечателен тот факт, что добавки ДЭТА приводят к увеличению скорости детонации смеси примерно на 1.5 %, когда концентрация ацетона меньше предельного значения, равного 27 % [6]. Аналогичный эффект незначительного увеличения скорости детонации в НМ наблюдался ранее при малых, не превышающих 0.5 %, добавках сенсibilизатора [8].

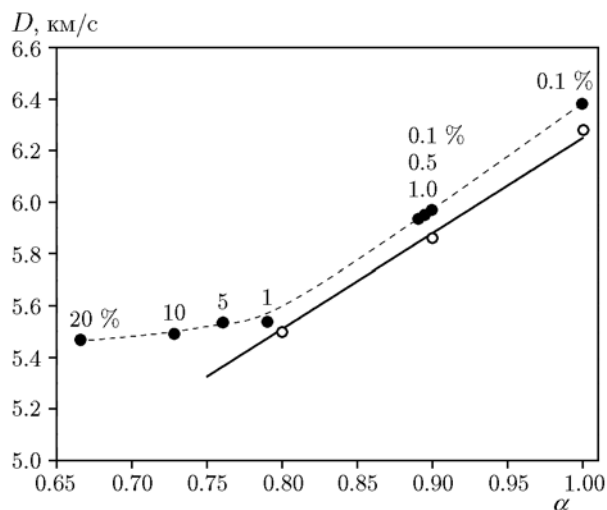


Рис. 7. Зависимость скорости детонации от концентрации нитрометана в смеси НМ/А + ДЭТА

Но наиболее неожиданным является практически постоянное значение скорости детонации при добавлении в смесь НМ/А 80/20 от 1 до 20 % ДЭТА. Концентрация НМ при этом уменьшается от 80 до 66.7 %, а скорость детонации остается на уровне 5.45 км/с. Как отмечалось выше, детонационные волны в этих смесях неустойчивы и сенсibilизатор лишь снижает амплитуду осцилляций.

Похожая зависимость скорости детонации от концентрации НМ наблюдается и в смеси НМ/М + ДЭТА, что демонстрирует рис. 8.

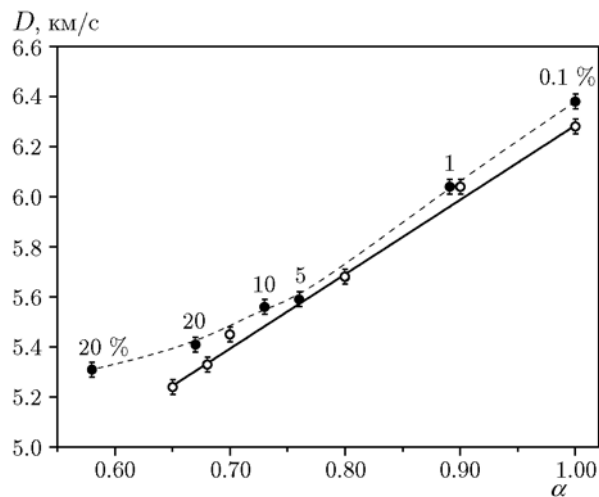


Рис. 8. Зависимость скорости детонации от концентрации нитрометана в смеси НМ/М + ДЭТА

Сплошная прямая представляет собой аппроксимацию этой зависимости для смеси НМ/М: $D = 3.31 + 2.97\alpha$. Скорость детонации при добавлении сенсibilизатора в смесь НМ/М, в которой массовая концентрация метанола меньше предельной (40 % [7, 12]), также увеличивается, хотя это выражено не столь отчетливо, как в смесях с ацетоном. Но наиболее удивительно то, что, как и в смесях с ацетоном, снижение скорости детонации резко замедляется при добавлении 20 % ДЭТА в смеси НМ/М 80/20 и 70/30, когда концентрация НМ становится меньше 67 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показали, что сенсibilизатор ДЭТА оказывает стабилизирующее воздействие на неустойчивые детонационные волны в смесях нитрометана с ацетоном или метанолом, либо полностью подавляя неустойчивость, либо заметно уменьшая амплитуду осцилляций. Обусловлено это резким увеличением скорости химической реакции НМ при добавлении аминов. Причины такого влияния детально проанализированы в ряде работ [13–17]. С точки зрения устойчивости одномерной детонационной волны важен тот факт, что амины снижают энергию активации, стабилизируя тем самым течение. Дестабилизирующим фактором является уменьшение температуры в зоне реакции по мере увеличения концентрации инертного разбавителя. Взаимное влияние этих двух факторов определяет состав смесей с устойчивым детонационным фронтом.

Потеря устойчивости детонационного фронта в общем случае не означает, что перестает быть справедливой одномерная теория детонации для осредненных профилей. При малой амплитуде осцилляций, когда концентрация ацетона или метанола не превышает 10 %, профили массовой скорости имеют вид, типичный для одномерной детонации с отчетливо выраженным хипиком в зоне реакции. Ситуация не столь очевидна при больших концентрациях разбавителя, когда характерный размер неоднородностей сравним с шириной зоны химической реакции. Как уже отмечалось, при концентрации ацетона или метанола 20 % вообще не приходится говорить о каком-либо распределении параметров в зоне реакции. Отчасти это обусловлено схемой регистрации. Во-первых, использование 7-микронной алюминиевой фольги не дает

заметного сглаживания осцилляций, когда их амплитуда сопоставима или превышает толщину фольги. Во-вторых, размер пятна, до которого фокусируется лазерный луч на поверхности фольги, составляет примерно 100 мкм, что меньше характерного поперечного размера неоднородностей [9]. Поэтому при сильно развитой неустойчивости используемый метод регистрации, являющийся локальным, не позволяет получить информацию об осредненном профиле скорости. Однако это возможно при использовании толстой, до 400 мкм, алюминиевой фольги, при распространении по которой амплитуда осцилляций затухает и регистрируемые профили скорости дают информацию об осредненном распределении параметров в неустойчивых детонационных волнах. В работе [7] такая схема регистрации позволила получить воспроизводимые результаты для смеси НМ/М 65/35, близкой к предельной по концентрационному составу. Данные, полученные аналогичным образом для смеси НМ/А, приведены на рис. 9.

На рис. 9 после ударного скачка наблюдается спад скорости на границе фольга — вода, длительность и амплитуда которого определяются параметрами химпика в смеси НМ/А. Последующий подъем скорости через 25 нс при использовании 100-микронной фольги

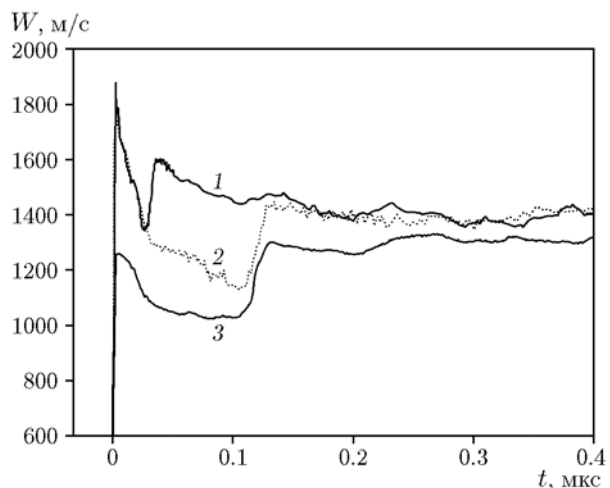


Рис. 9. Профили скорости на границе ВВ/водяное окно:

1 — НМ/А 80/20, толщина алюминиевой фольги 100 мкм; 2 — НМ/А 80/20, толщина алюминиевой фольги 400 мкм; 3 — НМ/А 80/20 + 20 % ДЭТА, толщина алюминиевой фольги 400 мкм; стальная оболочка

(профиль 1) и через 100 нс для 400-микронной (профили 2, 3) обусловлен циркуляцией волн сжатия и разрежения в фольге. По мере распространения по фольге осцилляции скорости практически полностью затухают и можно оценить характерную длительность химпика. Для смеси НМ/А 80/20 (профиль 2) она превышает 100 нс, причем можно говорить о двухстадийности процесса: быстрая реакция в течение первых ≈ 30 нс и затем более медленная стадия. Следует отметить, что добавка ДЭТА (профиль 3) заметно уменьшает амплитуду химпика и время реакции, которое не превышает 70 нс. Причем сокращение ширины зоны реакции происходит в результате исчезновения медленной стадии.

Уменьшение времени реакции смесей НМ с инертными разбавителями при добавлении ДЭТА является, вероятно, причиной резкого замедления падения скорости детонации и выхода ее на постоянное значение $5.2 \div 5.4$ км/с с уменьшением концентрации НМ в смеси (см. рис. 7, 8). Объяснить такой характер изменения скорости невозможно с точки зрения термодинамики, поскольку ДЭТА в этом отношении ведет себя аналогично ацетону и метанолу. Причина, скорее всего, кроется в изменении скорости разложения НМ при добавлении сенсibilизатора. Действительно, с уменьшением концентрации НМ в его смесях с ацетоном или метанолом скорость детонации падает не только из-за уменьшения теплоты взрыва на единицу массы, но и из-за неполноты превращения. Поскольку увеличение времени реакции приводит к тому, что часть ВВ не успевает прореагировать в зоне реакции и разлагается в волне разгрузки, добавка ДЭТА сокращает время реакции и тем самым способствует повышению энерговыделения непосредственно в зоне реакции, что замедляет падение скорости детонации с увеличением концентрации сенсibilизатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в смесь сенсibilизатора диэтилентриамин приводит либо к подавлению неустойчивости детонационного фронта в смесях нитрометана с ацетоном или метанолом, если концентрация инертного разбавителя не превышает 10 %, либо к существенному уменьшению амплитуды осцилляций при более высоких концентрациях разбавителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Зверев И. Н., Смирнов Н. Н. Газодинамика горения. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
4. Зайдель Р. М. Об устойчивости детонационных волн в газовых смесях // Докл. АН СССР. — 1961. — Т. 136, № 5. — С. 1142–1145.
5. Асланов С. К., Будзирковский В. Н., Щелкин К. И. Исследование газодинамической устойчивости детонационной волны произвольного профиля // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 182, № 1. — С. 53–55.
6. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
7. 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.
8. Уткин А. В., Мочалова В. М., Логвиненко А. А. Влияние диэтилентриамин на структуру детонационных волн в нитрометане // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 107–113.
9. Торуннов С. И., Кулиш М. И., Мочалова В. М., Уткин А. В., Якушев В. В. Экспериментальное исследование рельефа фронта стационарной детонации жидких ВВ // Хим. физика. — 2013. — Т. 32, № 12. — С. 32–37.
10. Химическая энциклопедия. Т. 1 / гл. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Сов. энцикл., 1998.
11. Химическая энциклопедия. Т. 3 / гл. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Сов. энцикл., 1992.
12. Колдунов С. А., Ананьин А. В., Гаранин В. А., Сосиков В. А., Торуннов С. И. Детонационные характеристики разбавленных жидких взрывчатых веществ: смеси нитрометана с метанолом // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 73–79.
13. Engelke R. Effect of a chemical inhomogeneity on steady-state detonation velocity // Phys. Fluids. — 1980. — V. 23. — P. 785–880.
14. 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.
15. 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.

-
16. **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.
17. **Gruzdkov Y. A., Gupta Y. M.** Mechanism of amine sensitization in shocked nitromethane // J. Phys. Chem. A. — 1998. — V. 102, N 13. — P. 2322–2331.

*Поступила в редакцию 21/І 2015 г.,
в окончательном варианте — 18/ІІІ 2015 г.*
