

УДК 534.222.2

ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Д. Ю. Рапота, А. В. Уткин, В. М. Мочалова,
С. И. Торуннов, В. А. СосиковФедеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, daniil.yurievich@gmail.com

Проведены эксперименты с целью изучения процесса ударно-волнового инициирования детонации в чистом тетранитрометане и его смесях с ацетоном, нитробензолом и метанолом. Свечение детонационного фронта фиксировалось скоростными камерами в режиме щелевой развертки и покадровой съемки. Зафиксирован очаговый режим инициирования детонации как в чистом тетранитрометане, так и в его смесях с разбавителями. Установлено, что количество очагов, характер их возникновения, закономерности их роста и слияния зависят от природы разбавителей. Эволюция волновых профилей регистрировалась многоточечным лазерным интерферометром VISAR. Полученные профили скорости существенно отличаются от предсказываемых классической схемой инициирования и развития детонации при ударно-волновом воздействии.

Ключевые слова: тетранитрометан, ацетон, нитробензол, метанол, детонация, химпик, неустойчивость, скорость детонации, параметры Чепмена — Жуге.

DOI 10.15372/FGV2022.9270

ВВЕДЕНИЕ

Исследование перехода ударной волны в детонационную позволяет получить важную информацию об особенностях инициирования и развития детонации во взрывчатых веществах (ВВ). Во-первых, это один из наиболее информативных методов извлечения данных о механизмах возникновения и протекания химических реакций в ВВ, которые обеспечивают полное тепловыделение за относительно короткое время ударного нагружения. Во-вторых, это дает ответ на вопрос о структуре гидродинамических потоков, которые формируются в нестационарных детонационных волнах.

Существующие теоретические представления описывают процесс инициирования детонации в гомогенных жидких ВВ как тепловой взрыв в ударно-сжатом слое вещества на границе экран/ВВ. Соответствующая идеализированная схема волновых течений показана на рис. 1 [1, 2]. Из инертного экрана в ВВ входит ударная волна 1, под действием которой происходят сжатие и разогрев вещества. Ударно-сжатое ВВ не реагирует в течение

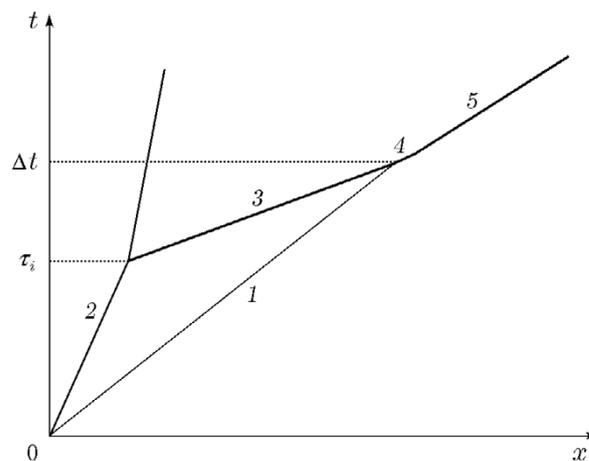


Рис. 1. Схема ударно-волнового инициирования жидких ВВ:

1 — инициирующая ударная волна, 2 — движение границы экран/ВВ, 3 — сверхскоростная детонация в ударно-сжатом ВВ, 4 — пересжатая детонация, 5 — нормальная детонация, τ_i — период индукции, Δt — момент времени, когда сверхскоростная детонация догоняет фронт ударной волны (1)

времени, равного периоду индукции теплового взрыва τ_i , которое зависит от кинетики и температуры. Впервые условия теплового взрыва реализуются на границе с инертным экраном 2. Тепловой взрыв приводит к формированию сверхскоростной детонации 3, кото-

Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ (№ АААА-А19-119071190040-5).

© Рапота Д. Ю., Уткин А. В., Мочалова В. М.,
Торуннов С. И., Сосиков В. А., 2023.

рая распространяется по ударно-сжатому ВВ со скоростью, значительно превышающей нормальную скорость детонации. В момент времени Δt сверхскоростная детонация догоняет фронт ударной волны, в исследуемом ВВ реализуется режим пересжатой детонации 4, который переходит в стационарную детонацию 5. Наиболее детально процессы ударно-волнового инициирования исследованы для нитрометана и его смесей с инертными разбавителями, на примере которых показано, что приведенная схема хорошо описывает наблюдаемые явления [1–4]. Тем не менее в работе [5] авторы зарегистрировали ячеистый характер инициирования детонации в нитрометане, не предполагаемый классической моделью. Исследования применимости этой модели для описания других ВВ крайне ограничены. Следует отметить работу [6], авторы которой методом оптической пирометрии изучали инициирование и распространение детонации в жидких ВВ бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)формаль и изопропилнитрат. В первом из них наблюдался, в частности, переход от пересжатого к нормальному режиму детонации, однако область сверхскоростной детонации не зафиксирована.

Целью данной работы является изучение процесса ударно-волнового инициирования детонации в жидких ВВ на основе тетранитрометана (ТНМ) с использованием ацетона (Ац), метанола (М) и нитробензола (НБ) в качестве разбавителей, которые смешиваются с ТНМ в различных соотношениях [7, 8].

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Тетранитрометан — относительно мощное жидкое ВВ с начальной плотностью 1.64 г/см^3 , скоростью детонации 6.48 км/с и давлением в точке Чепмена — Жуге 16.5 ГПа [9–13]. Он является сильным окислителем с положительным кислородным балансом, равным 49 %. Поэтому добавки горючего, такого как нитробензол, метанол и ацетон, позволяют изменять теплоту взрыва, а следовательно, и параметры детонации смеси, которые достигают максимальных значений при стехиометрическом соотношении компонентов. Можно ожидать, что состав смесей отразится и на закономерностях ударно-волнового инициирования детонации. В проведенных опытах основная часть экспериментов выполнена с чистым тетранитрометаном и его смесями ТНМ/Ац,

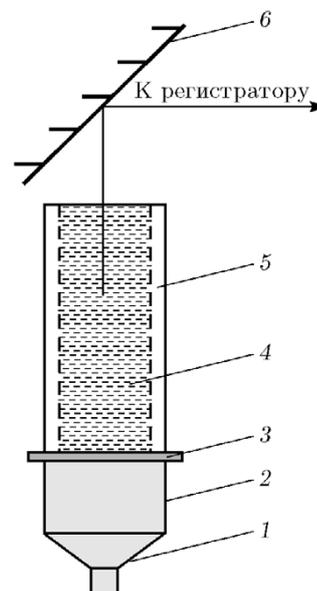


Рис. 2. Схема эксперимента по регистрации свечения детонационного фронта:

1 — плосковолновой генератор, 2 — таблетка ВВ, 3 — экран, 4 — исследуемое жидкое ВВ, 5 — оболочка, 6 — зеркало

ТНМ/М и ТНМ/НБ с соотношением концентраций 85/15, близким к стехиометрическому составу (ТНМ/НБ — 76.85/23.15, ТНМ/М — 75.4/24.6, ТНМ/Ац — 81.8/18.2).

Регистрация свечения детонации при ударно-волновом инициировании осуществлялась скоростными камерами в режиме щелевой развертки (СФР) и покадровой съемки (НАНОГЕЙТ-4БП и НАНОГЕЙТ-22/16). Соответствующая схема экспериментов показана на рис. 2. Иницирование детонации проводилось путем подрыва плосковолнового генератора 1 из прессованного флегматизированного гексогена и заряда тротила 2 плотностью 1.36 г/см^3 . Для формирования ударной волны и отсеечения продуктов детонации использовался экран 3 из прессованного фторопласта-4 толщиной 10 мм. Диаметр тротилового заряда и экрана 80 мм. Исследуемое ВВ 4 находилось в цилиндрической оболочке из полипропилена 5 с внутренним диаметром 66 мм, высотой 50 мм и толщиной стенки 5 мм. Свечение фронта наблюдалось через поворотное зеркало 6, установленное над верхним срезом кюветы под углом 45° . Фоторегистратором СФР съемка осуществлялась на высокочувствительную пленку Pford Delta 3200 135/36. Фотокамеры НАНОГЕЙТ-4БП и НАНОГЕЙТ-22/16 работа-

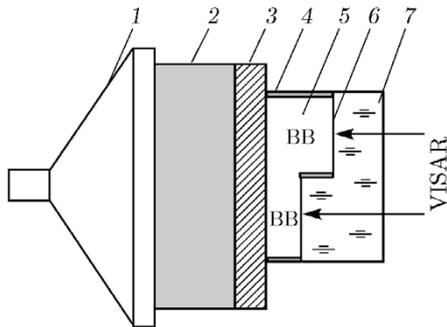


Рис. 3. Схема экспериментальной сборки по регистрации ударно-волновых профилей в двух точках:

1 — плосковолновой генератор, 2 — таблетка ВВ, 3 — экран, 4 — кювета, 5 — исследуемое жидкое ВВ, 6 — фольга, 7 — водяное окно

ли в режиме покадровой съемки с выдержкой 10 нс/кадр.

Для исследования характера эволюции волновых профилей в режиме инициирования и развития детонации в смесях тетранитрометана с нитробензолом использовался многоточечный лазерный интерферометр VISAR с наносекундным временным разрешением. Схема эксперимента приведена на рис. 3. Иницирование детонации, как и на рис. 2, осуществлялось плосковолновым генератором 1 и зарядом тротила 2 через экран 3 из фторопласта-4. Исследуемое жидкое ВВ 5 наливалось в цилиндрическую кювету 4. Кюветы в экспериментах были разделены по центру поперечного среза вертикальной перегородкой так, чтобы две соседние части могли иметь разные высоты. Зондирующее излучение отражалось от 7-микронной алюминиевой фольги 6, расположенной между торцом заряда и водяным окном 7. Регистрация волновых профилей осуществлялась в двух точках заряда, расположенных на разном расстоянии от экрана. Точки выбирались таким образом, чтобы исключить влияние кривизны фронта детонационной волны и волн разрежения, приходящих с краев. Такая схема эксперимента позволяла получить информацию об эволюции волновых профилей на разной глубине в одном эксперименте. Для определения абсолютной величины скорости одновременно применялись два интерферометра с различными постоянными: 280 и 1280 м/с.

Параметры инициирующей ударной волны определялись в отдельных экспериментах посредством регистрации скорости границы экран/вода. Начальная амплитуда импульса

сжатия составляла 9.0 ГПа и уменьшалась до 75 ГПа за время 2 мкс. Соответствующая зависимость массовой скорости от времени во входящем в исследуемое ВВ импульсе сжатия приведена в § 2.3 (см. рис. 14).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Регистрация свечения детонации в режиме щелевой развертки

На рис. 4–7 представлены фоторазвертки свечения детонационного фронта в тетранитрометане и его смесях с метанолом и нитробензолом, ось времени направлена вправо. Из полученных кадров можно судить о периоде индукции теплового взрыва в образцах, характере инициирования и структуре фронта детонации.

В экспериментах с чистым тетранитрометаном (рис. 4) отчетливо наблюдается момент входа ударной волны в вещество 1. Спустя 1.0 ± 0.1 мкс заметны множественные вспышки 2 вдоль плоскости заряда, что говорит об очаговом характере инициирования детонации. Ввиду высокой скорости роста каждого отдельного очага и их большого количества, линия вспышки не является гладкой, а имеет слабо-волнистую структуру. Разрастаясь, очаги не сразу образуют детонационный фронт, в местах их слияния довольно продолжительное время отчетливо наблюдаются яркосветящиеся области повышенных параметров. При установлении стационарного режима 3 возмущения исчезают, о чем также говорит равномерный

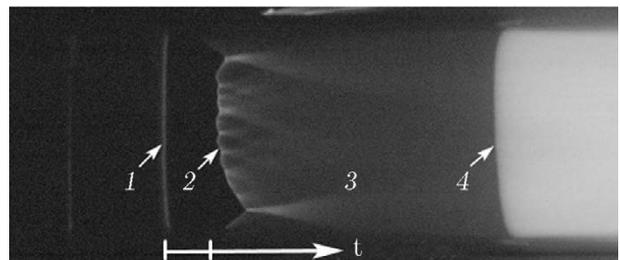


Рис. 4. Фоторазвертка свечения при инициировании тетранитрометана:

1 — момент входа ударной волны в тетранитрометан, 2 — момент образования детонации в невозмущенном жидком ВВ, 3 — свечение нормальной детонации, 4 — выход детонационной волны на свободную поверхность; время между вертикальными штрихами на оси t равно 1 мкс

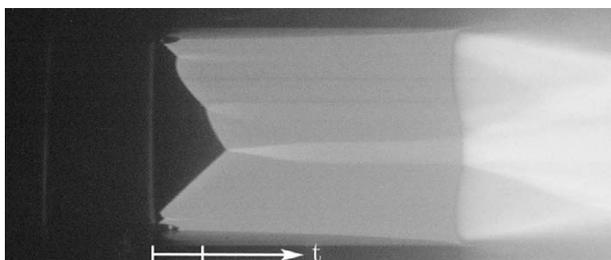


Рис. 5. Фоторазвертка свечения при инициировании смеси ТНМ/М 85/15

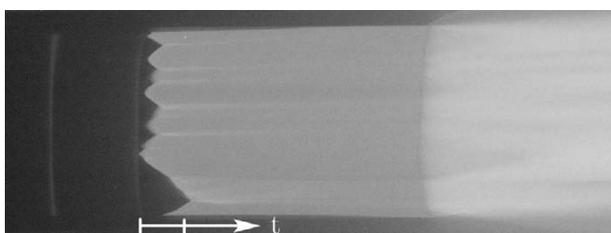


Рис. 6. Фоторазвертка свечения при инициировании смеси ТНМ/НВ 85/15

разлет продуктов взрыва 4 при выходе детонационной волны на свободную поверхность.

Добавление в тетранитрометан метанола в количестве 15 % (мас.) (рис. 5) приводит к заметному уменьшению периода индукции теплового взрыва, до величины порядка 0.1 мкс. Количество очагов также заметно уменьшается, как и скорость их разрастания, о чем свидетельствуют малые углы расхождения светящихся областей в левой части фоторазвертки. Кроме того, по неравномерно искривленной границе области свечения можно судить о большом разбросе очагов по сечению заряда, в результате чего свечение от точек, расположенных в стороне от линии наблюдения, приходит на щель заметно позже, когда очаги уже успели разрастись. Стоит заметить, что, как и в чистом нитрометане, наблюдается неоднородный характер свечения фронта по мере распространения детонационной волны, причем это регистрируется на протяжении всего эксперимента.

Смесь тетранитрометана с нитробензолом 15 % (мас.) (рис. 6) показывает схожую картину развития детонации. Об изменении среднего количества возникающих очагов говорить сложно, однако всё так же заметно сильное сокращение периода индукции в образце и падение скорости роста очагов относительно чистого тетранитрометана. Как и в случае с мета-

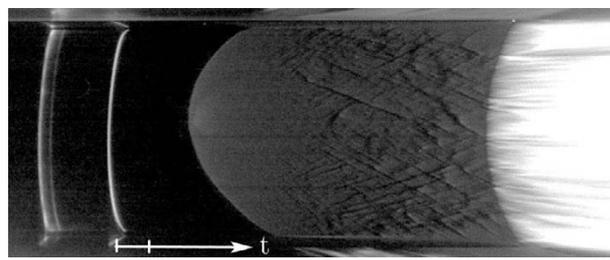


Рис. 7. Фоторазвертка свечения при инициировании смеси ТНМ/М 40/60

нолом, неоднородное свечение детонации сохраняется на протяжении всего времени регистрации.

Существенные изменения картины инициирования заметны лишь при приближении разбавителей к критическим концентрациям (рис. 7). Когда количество метанола в тетранитрометане становится 60 % (мас.), при его критической концентрации 63 % очаги исчезают и граница области свечения становится гладкой.

2.2. Покадровая съемка процесса инициирования детонации

Скоростной фоторегистратор хотя и позволяет получить информацию о динамике развития детонационного фронта на протяжении всего эксперимента, имеет ряд особенностей, позволяющих судить о наблюдаемой картине поверхности. Использование скоростных фотокамер позволяет получить значительно более полное представление как о характере возникновения и эволюции очагов инициирования детонации, так и о процессах, происходящих на поверхности детонационного фронта.

При помощи сверхскоростных фотокамер НАНОГЕЙТ-4БП и НАНОГЕЙТ-22/16 получены снимки развития детонационного фронта в момент его зарождения в чистом тетранитрометане и в его смесях с разбавителями (рис. 8–12).

На первом кадре для тетранитрометана на рис. 8 наблюдается область слабого свечения, предшествующего детонационной вспышке, которую условно можно назвать областью преднагрева. Следующий кадр демонстрирует инициирование детонации в этой области. При этом свечение не является равномерным и имеет характерную очаговую структуру. С течением времени область инициирования разрас-

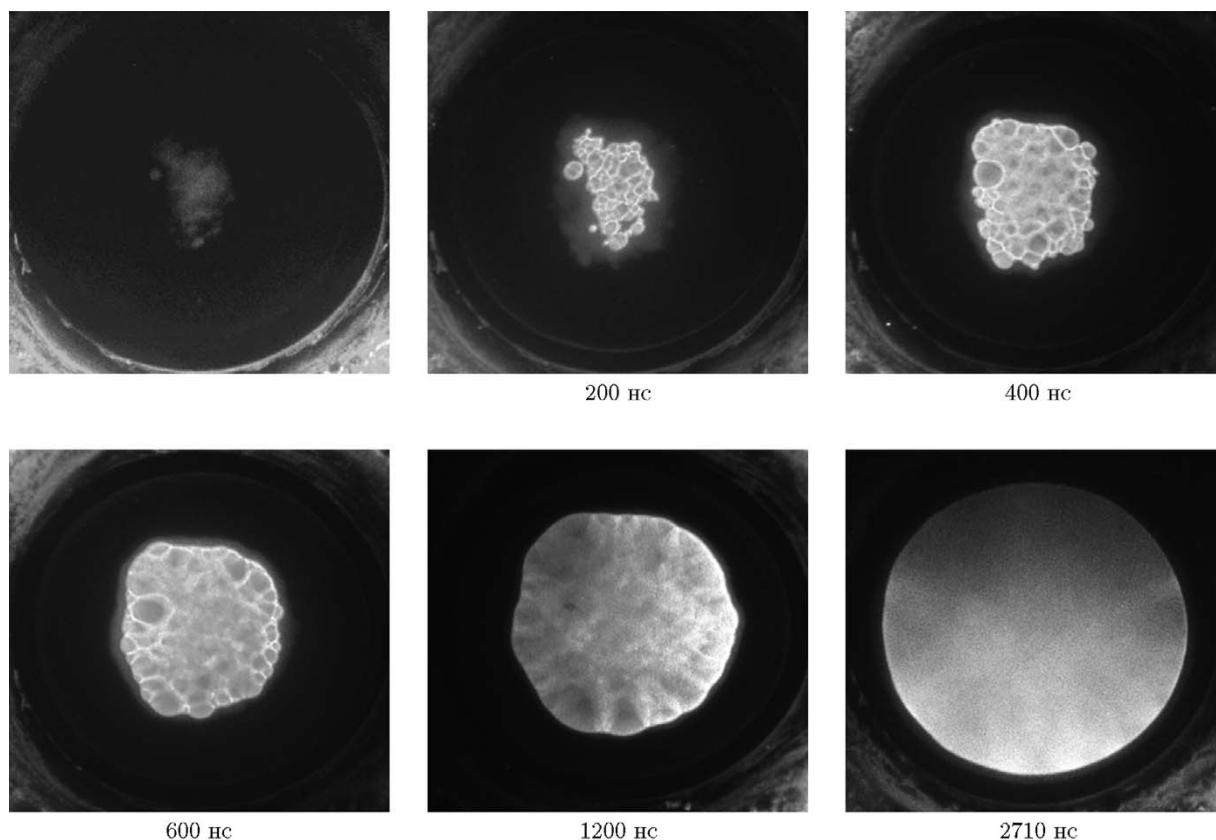


Рис. 8. Сверхскоростная фотосъемка камерой НАНОГЕЙТ-22/16 свечения детонационного фронта при инициировании чистого тетранитрометана через экран из прессованного фторопласта-4

тается, сохраняя неоднородную структуру, которая проявляется даже спустя 3 мкс от момента входа ударной волны в ВВ (шестой кадр на рис. 8). Посредством наложения кадров была определена скорость роста области детонации, которая уменьшается примерно от 20 км/с в начальный момент инициирования детонации до 8.5 км/с.

Поскольку очаговый характер инициирования детонации обусловлен проявлением неустойчивости теплового взрыва, конкретная картина возникновения очагов должна зависеть от многих внешних факторов, в частности от состояния поверхности экрана, через который в исследуемое ВВ входит инициирующая ударная волна. Для проверки этого предположения был проведен эксперимент, в котором экран из прессованного фторопласта-4 заменялся экраном из литого фторопласта-4 (рис. 9). Более однородная структура поверхности экрана привела к уменьшению количества возникающих очагов и меньшему перепаду скорости роста области детонации, от 10

до 8.5 км/с. Однако качественно картина не изменилась, инициирование всё так же носит очаговый характер.

Добавление в тетранитрометан разбавителей при сохранении неизменной природы очагового характера инициирования смесей приводит к заметному изменению динамики возникновения и роста очагов. На рис. 10 представлены результаты экспериментов для смеси ТНМ/НБ 85/15. Сопоставление первого и второго кадров показывает, что, в отличие от чистого тетранитрометана, наряду с ростом возникших ранее очагов наблюдается возникновение новых. Причем очаги разнесены по плоскости инициирования и процесс их слияния затянут во времени. Характерная скорость роста очагов составляет 10 км/с.

Еще ярче разновременность возникновения очагов инициирования проявляется в смеси ТНМ/Ац 85/15. На рис. 11 наблюдается сильный разброс во времени их возникновения. Причем если в первые 200 нс существует всего несколько очагов, то спустя 100 нс их количе-

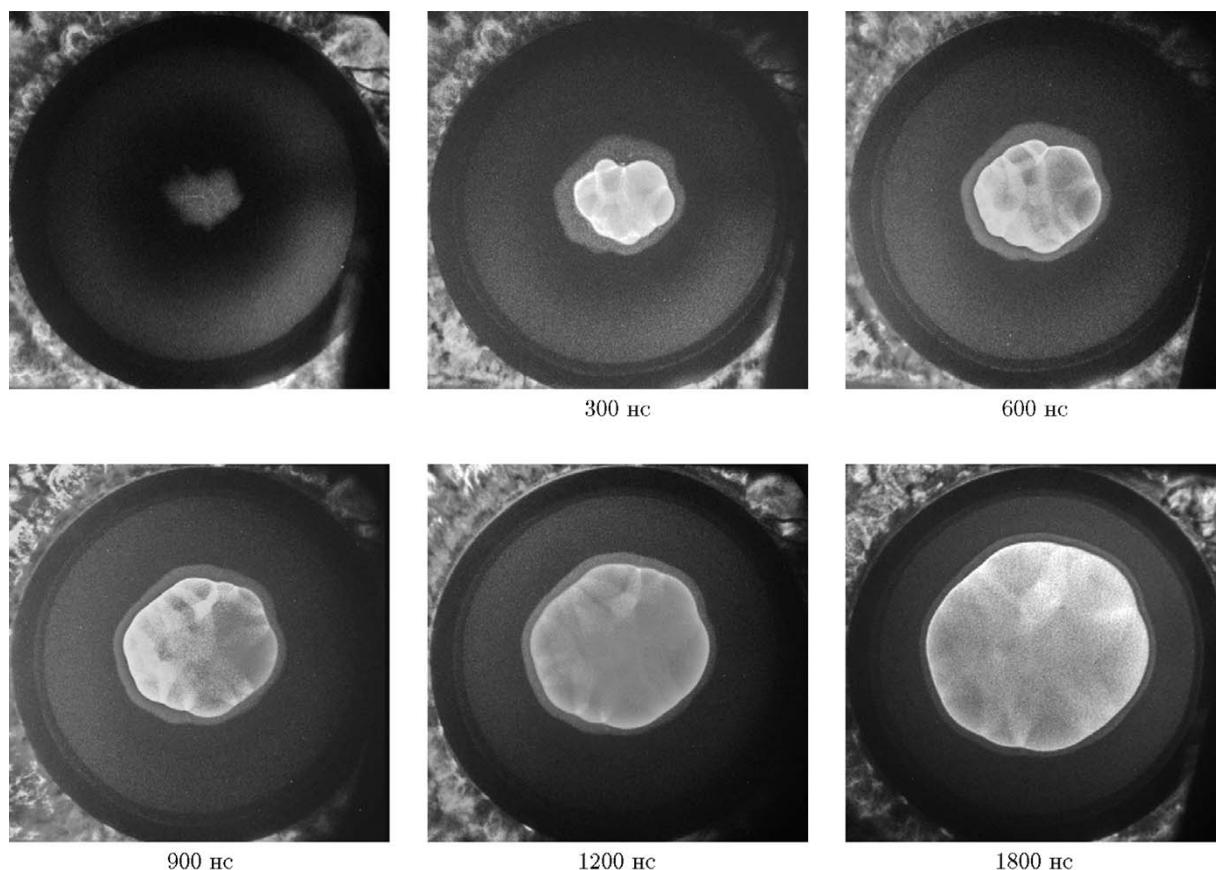


Рис. 9. Сверхскоростная фотосъемка камерой НАНОГЕЙТ-22/16 свечения детонационного фронта при инициировании чистого тетранитрометана через экран из литого фторопласта-4

ство резко увеличивается (четвертый кадр на рис. 11). Противоположная картина наблюдается в смеси ТНМ/М 85/15 (рис. 12). В данном случае возникшее в начальный момент времени количество очагов остается неизменным и представленные кадры демонстрируют увеличение их размеров и последующее слияние. Из всех исследованных составов характерная скорость роста отдельных очагов минимальна в смеси с метанолом — 45 ± 0.5 км/с.

2.3. Структура волновых профилей

Очаговый характер ударно-волнового инициирования детонации в смесевых ВВ на основе тетранитрометана приводит к существенно неоднородному течению в области роста и слияния очагов, что должно отразиться на структуре волновых профилей. Возникающие при этом особенности наиболее ярко проявляются при сопоставлении профилей массовой скорости в нитрометане и смеси ТНМ/НБ в окрестности стехиометрической концентрации.

Согласно классической схеме (см. рис. 1) в сечении, находящемся в области существования сверхскоростной детонации, формируется двухволновая конфигурация: первая волна соответствует инициирующей ударной волне, а вторая сверхскоростной детонации. Именно такой характер течения наблюдается при ударно-волновом инициировании нитрометана. В качестве примера на рис. 13 приведены измеренные нами профили скорости в нитрометане на различном расстоянии от экрана. Схема экспериментов аналогична представленной на рис. 3, но ударная волна формировалась при соударении 10-миллиметрового алюминиевого ударника, скорость которого равнялась 2.5 км/с, с алюминиевым экраном толщиной 4 мм. Профиль 0 соответствует входящей в нитрометан инициирующей ударной волне. На расстоянии от экрана 0.9 мм регистрируется двухволновая конфигурация. Первая волна является инициирующей ударной волной, а вторая, пришедшая в данное сечение через 0.34 мкс, — сверхско-

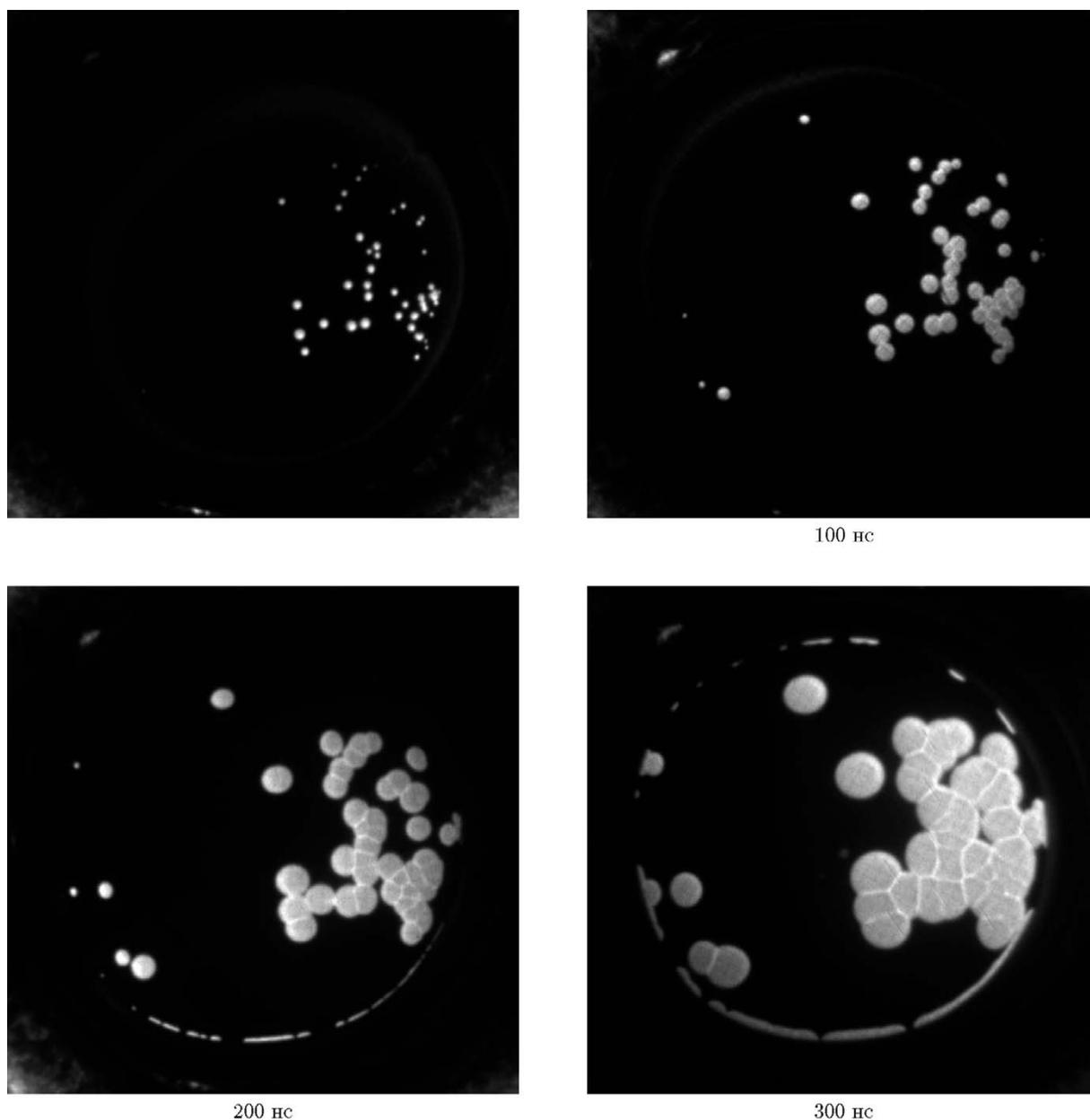


Рис. 10. Сверхскоростная фотосъемка камерой НАНОГЕЙТ-4БП свечения детонационного фронта при инициировании смеси ТММ/НБ 85/15

ростной. На расстояниях 2 и 2.9 мм ситуация аналогичная, но при этом время между фронтами сверхскоростной детонации и инициирующей ударной волны сокращается. На расстоянии 5.8 мм сверхскоростная детонация догоняет ударную волну и формируется пересжатая детонация, переходящая по мере распространения в детонацию Чепмена — Жуге. Подобный характер эволюции волновых профилей, полностью соответствующий классической модели инициирования детонации, наблюдался также авторами [14, 15].

Совсем иной характер течения регистрируется в смеси ТММ/НБ 76/24, что демонстрирует рис. 14, на котором приведены профили скорости на границе с водой. Условия инициирования аналогичны представленным выше результатам опытов по регистрации свечения фронта. Профиль 0 соответствует входящей в смесь инициирующей ударной волне. На расстоянии от экрана менее 5 мм регистрируется скачок скорости до величины, сопоставимой с параметрами Чепмена — Жуге при нормальной детонации [13], и далее скорость остается

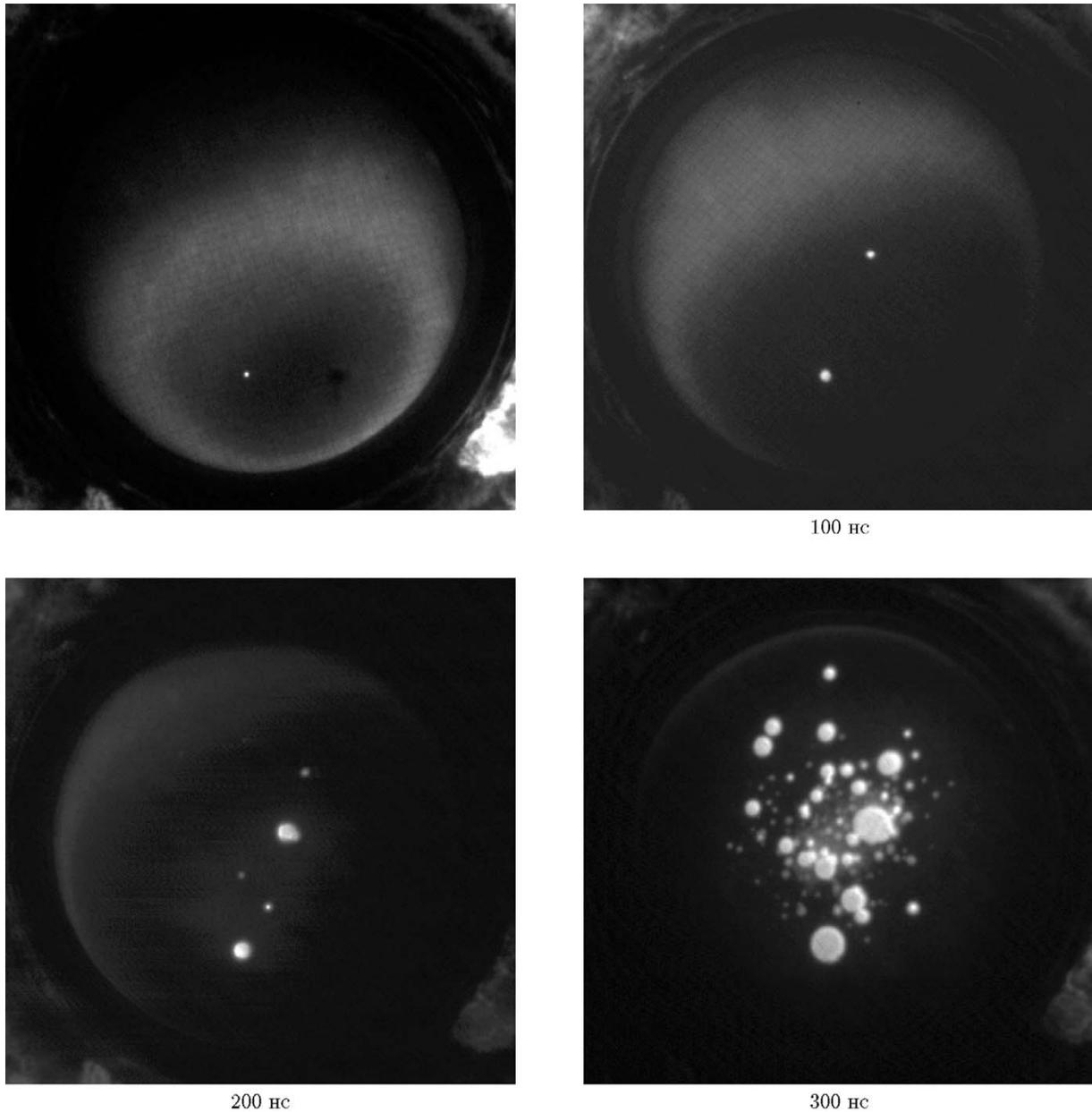


Рис. 11. Сверхскоростная фотосъемка камерой НАНОГЕЙТ-4БП свечения детонационного фронта при инициировании смеси ТНМ/Ац 85/15

постоянной в течение времени, которое уменьшается по мере распространения волны. Так, например, если на расстоянии 1.8 мм скорость постоянна в течение 0.5 мкс, то после прохождения волной еще 2 мм (расстояние от экрана равно 3.8 мм, рис. 14) постоянный уровень скорости сохраняется не более 0.3 мкс. При этом скорость распространения волны между точками 1.8 и 3.8 мм, измерения в которых проведены в одном эксперименте, составляет 3.4 км/с, что не соответствует столь высоким амплитудным значениям массовой скорости.

По мере увеличения толщины образца скорость распространения волны возрастает и на базе измерения 5.0 ÷ 6.8 мм (профили скорости в сечениях 5.0 и 6.8 мм измерены в одном опыте) составляет 5.0 км/с. При этом амплитуда скорости уменьшается, а форма волнового профиля эволюционирует к характерному треугольному профилю.

Полученный характер изменения волновых профилей при ударно-волновом инициировании и развитии детонации в смеси ТНМ/НБ 76/24 можно интерпретировать следующим

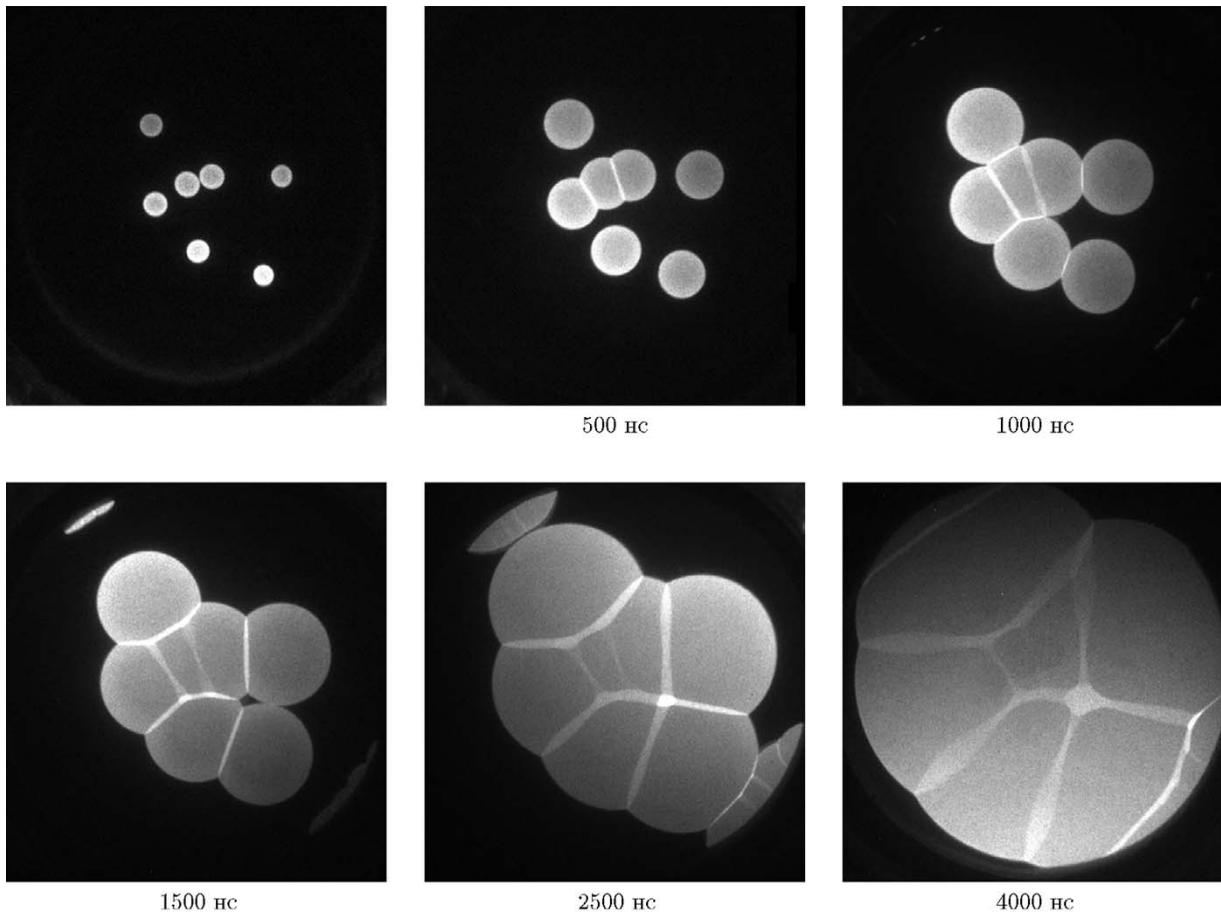


Рис. 12. Сверхскоростная фотосъемка камерой НАНОГЕЙТ-22/16 свечения детонационного фронта при инициировании смеси ТНМ/М 85/15

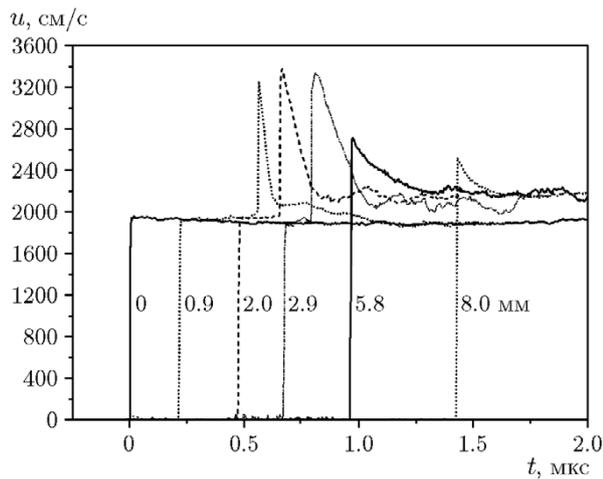


Рис. 13. Профили скорости на границе с водой в эксперименте с нитрометаном на различных расстояниях от экрана

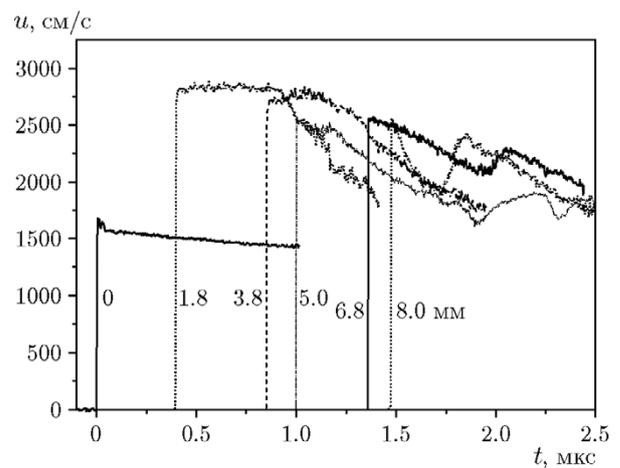


Рис. 14. Профили скорости на границе с водой в эксперименте со смесью ТНМ/НВ 76/24 на различных расстояниях от экрана

образом. При использовании интерферометра VISAR происходит осреднение скорости по площади диаметром около 100 мкм, в резуль-

тате чего течение, возникающее при многоточечном инициировании, осредняется и воспринимается как тепловой взрыв ударно-сжатого

слоя ВВ толщиной около 2 мм. Этим, в частности, а также и низкой скоростью распространения волны объясняется формирование «прямоугольных» импульсов сжатия, зарегистрированных на расстояниях 1.8 и 3.8 мм от экрана. Затем прореагировавший слой ВВ, находящийся при высоком давлении, разгружается в исходную смесь ТНМ/НБ и начинает формироваться стационарный детонационный режим.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показывают, что закономерности ударно-волнового инициирования и развития детонации в жидких ВВ на основе тетранитрометана существенно отличаются от классических представлений. Причиной этого является очаговый характер теплового взрыва в ударно-сжатом ВВ. Динамика возникновения, роста и слияния очагов определяется кинетикой химических реакций и изменяется при использовании различных разбавителей. При этом качественная картина явления остается неизменной, что демонстрируют результаты оптических методов регистрации свечения детонации, приведенные на рис. 4–12. Вероятно, инициирование детонации в отдельных очагах, а не по всей поверхности ударно-сжатого слоя, прилегающего к экрану, обусловлено неустойчивостью теплового взрыва. Это явление исследовалось многими авторами, и обзор работ, посвященных данной проблеме, представлен, например, в [16], где показано, что установившийся температурный профиль в реагирующей среде является неустойчивым по отношению к малым возмущениям. Причем существует гармоника, растущая с максимальной скоростью, которая и определяет характер развития теплового взрыва [17].

Следствием неустойчивости является и формирование неоднородной слабосветящейся области преднагрева в чистом тетранитрометане (первый кадр на рис. 8), связанной с протеканием экзотермических реакций в веществе до инициирования детонации. Ранее подобные структуры наблюдались в газах и смесевых топливах [18, 19], а роль реакций в ударно-сжатых веществах до инициирования детонации обсуждалась в работах [5, 6, 20, 21]. В работе [6] отмечается, что в ВВ бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)формаль, в отличие от классической схемы инициирования детонации, разложение начинается непосредственно за фронтом инициирующей ударной волны. Причем

«наблюдаемое в опытах излучение на начальной стадии распространения можно рассматривать как суперпозицию неравновесного излучения возбужденных молекул, возникших активных центров реакции, развивающихся очагов реакции» [6].

В данной работе исследовано ударно-волновое инициирование смесей в окрестности стехиометрической концентрации разбавителей, где наиболее ярко выражен очаговый характер возникновения детонации. Влияние концентрации на кинетику химических реакций должно проявиться в особенностях процесса инициирования. Об этом свидетельствует, в частности, фоторазвертка свечения в смеси ТНМ/М 40/60 (см. рис. 7), на которой очаги не наблюдаются.

Очаговый характер ударно-волнового инициирования детонации принципиально меняет поле скоростей в области роста и слияния очагов. Полученные профили массовых скоростей в смеси тетранитрометана с нитробензолом свидетельствуют об отсутствии сверхскоростной детонации. Это является следствием высокой скорости роста очагов, в результате чего они достигают фронта инициирующей ударной волны раньше, чем в ударно-сжатом ВВ сформируется сверхскоростная детонация. В итоге детонационный фронт устанавливается уже в исходной, не подверженной ударному сжатию смеси и соответствует пересжатой детонации, которая по мере распространения переходит в режим Чепмена — Жуге.

Таким образом, неустойчивость теплового взрыва ударно-сжатого жидкого ВВ может привести к нарушению одномерности течения при инициировании и развитии детонации, что делает невозможным применение классической модели для интерпретации экспериментально наблюдаемых явлений. Причем очаговый характер инициирования детонации в смесях на основе тетранитрометана приводит к существованию неоднородной структуры детонационной волны в течение достаточно длительного времени (см. рис. 4–6) несмотря на то, что установившаяся детонация устойчива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.

2. Bourne N. Materials in Mechanical Extremes: Fundamentals and Applications. — Cambridge Univ. Press, 2013.
3. Cook M. A., Pack D. H., Gey W. A. Deflagration to detonation transition // Symp. (Int.) Combust. — 1958. — V. 7, N 1. — P. 820–836. — DOI: 10.1016/S0082-0784(58)80126-5.
4. Campbell A., Davis W., Travis J. Shock initiation of detonation in liquid explosives // Phys. Fluids. — 1961. — V. 4, N 4. — P. 498–510. — DOI: 10.1063/1.1706354.
5. Nissen E. J., Bhowmick M., Dlott D. D. Shock-induced kinetics and cellular structures of liquid nitromethane detonation // Combust. Flame. — 2021. — V. 225. — P. 5–12. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.10.046.
6. Гогуля М. Ф., Бражников М. А., Долгобородов А. Ю., Душенок С. А. Исследование инициирования жидких взрывчатых веществ методом оптической пирометрии // Хим. физика. — 1998. — Т. 17, № 12. — С. 62–68.
7. Зотов Е. В. Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2004.
8. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
9. Федоров А. В. Параметры пика Неймана и структура фронта детонационной волны КВВ // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 10. — С. 13–21.
10. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Меньших А. В., Назаров Д. В., Финюшин С. А., Давыдов В. А. Об устойчивости детонационного фронта смесевых жидких ВВ: тетранитрометан-нитробензол и тетранитрометан-нитрометан // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 12. — С. 34–39.
11. 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.
12. Mochalova V., Utkin A. Determination of detonation parameters for liquid high explosives // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426, N 1. — P. 303–306.
13. Уткин А. В., Мочалова В. М., Астахов А. М., Рыкова В. Е., Колдунов С. А. Структура детонационных волн в смесях тетранитрометана с нитробензолом и метанолом // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 5. — С. 69–79. — DOI: 10.15372/FGV20200507.
14. Sheffield S. A., Dattelbaum D. M., Engelke R., Alcon R. R., Crouzet B., Robbins D. L., Stahl D. B., Gustavsen R. L. Homogeneous shock initiation process in neat and chemically sensitized nitromethane // 13th Int. Detonation Symp., Norfolk, Virginia, USA, 2006. — P. 401–407.
15. Bouyer V., Darbord I., Hervé P., Baudin G., Le Gallic C., Clément F., Chavent G. Shock-to-detonation transition of nitromethane: Time-resolved emission spectroscopy measurements // Combust. Flame. — 2006. — V. 144, N 1-2. — P. 139–150. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.07.004.
16. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
17. Шарыпов О. В. Введение в физику горения: учеб. пособие. — Новосибирск: НГУ, 2010.
18. Chang X., Zhang B., Ng H. D., Bai C. The effects of pre-ignition turbulence by gas jets on the explosion behavior of methane-oxygen mixtures // Fuel. — 2020. — V. 277. — 118190. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118190.
19. Wang Z., Qi Y., He X., Wang J., Shuai S., Law C. K. Analysis of pre-ignition to superknock: Hotspot-induced deflagration to detonation // Fuel. — 2015. — V. 144. — P. 222–227. — DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.061.
20. Zeman S., Atalar T., Friedl Z., Ju X.-H. Accounts of the new aspects of nitromethane initiation reactivity // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2009. — V. 6, N 1. — P. 119–133.
21. Nissen E. J., Bhowmick M., Dlott D. D. Ethylenediamine catalyzes nitromethane shock-to-detonation in two distinct ways // J. Phys. Chem. B. — 2021. — V. 125, N 29. — P. 8185–8192. — DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c04427.

Поступила в редакцию 29.11.2022.
Принята к публикации 14.12.2022.