

УДК 534.222.2

СТРУКТУРА НЕУСТОЙЧИВОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА В ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

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

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru

Проведены эксперименты по исследованию неустойчивости детонационных волн в смесях нитрометана, тетранитрометана и ФИФО с инертными разбавителями посредством регистрации свечения детонационного фронта скоростной восьмиканальной шестнадцатикадровой электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-22/16. В области неустойчивости детонации зарегистрировано неоднородное свечение детонационного фронта, которое связывается с турбулентным течением в зоне реакции. Формирование ячеистых структур с реакцией взрывчатого вещества в косых и поперечных волнах в исследованных составах не наблюдалось.

Ключевые слова: детонация, неустойчивость детонации, свечение детонационного фронта, нитрометан, тетранитрометан, ФИФО.

DOI 10.15372/FGV2023.9381

EDN JZPTNO

ВВЕДЕНИЕ

Детонационные волны в гомогенных взрывчатых веществах (ВВ) в зависимости от кинетики химической реакции могут распространяться как в устойчивом, так и в неустойчивом режиме [1–3]. При теоретическом исследовании детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга [4] показано, что течение в зоне химической реакции неустойчиво по отношению к малым возмущениям, если отношение энергии активации к температуре за ударным скачком превышает критическое значение [2, 5–7]. При этом характерная длина волны возмущений пропорциональна ширине зоны химической реакции. Следствием данного вида неустойчивости является формирование неоднородной структуры детонационного фронта.

Экспериментально неустойчивость детонационных волн в гомогенных ВВ наиболее детально изучена в газах [2, 3, 8–11]. Отмечается, в частности, что детонационный фронт имеет отчетливо выраженную ячеистую структуру [1]. Неустойчивость детонации в жидких ВВ исследована значительно в меньшей степени. Наиболее существенный вклад в ее изучение внесли авторы [7]. Ими, в частности, высказано

предположение, что в жидких ВВ, как и в газах, в результате потери устойчивости формируется сложная трехмерная структура фронта, одной из особенностей которой является возникновение косых и поперечных детонационных волн, в которых температура должна быть выше температуры ударно-сжатого нереагирующего ВВ, что должно проявляться на свечении фронта. Действительно, при регистрации свечения детонационного фронта смеси нитрометан/метанол 65/35 скоростной камерой в режиме щелевой развертки регистрируется сетка линий (рис. 1), отражающих поперечное смещение областей с различной светимостью. На рис. 1 эта сетка наиболее отчетливо выражена темными линиями, но в работе [7] приведены примеры, когда сетка формируется ярко светящимися линиями.

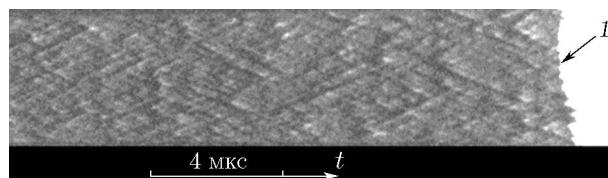


Рис. 1. Щелевая фоторазвертка распространения фронта детонации в смеси нитрометан/метанол 65/35:

I — выход детонационной волны на свободную поверхность

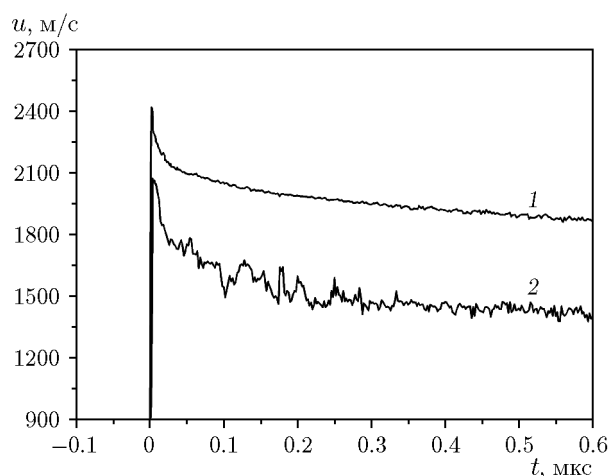


Рис. 2. Профили массовой скорости на границе ВВ/вода в чистом НМ (1) и смеси НМ/Ац 90/10 (2) (стальная оболочка)

Другой метод регистрации структуры неустойчивого детонационного фронта, основанный на регистрации профилей массовой скорости интерферометрической методикой VISAR, предложен в работах [12–15]. Для ряда ВВ показано, что в случае устойчивой детонации зависимости массовой скорости u от времени t являются гладкими и их структура соответствует классической модели детонации (зависимость 1 на рис. 2 для чистого нитрометана). При возникновении неустойчивости профили скорости становятся осциллирующими (зависимость 2 на рис. 2 для смеси нитрометана с ацетоном) и, варьируя условия проведения опытов, можно не только зафиксировать момент возникновения неустойчивости, но и оценить амплитуду возмущений.

Большинство используемых методов исследования дают, как правило, косвенную информацию о структуре неустойчивых детонационных волн, что часто не позволяет получить однозначный ответ о конкретном характере течения за фронтом. Так, например, остается открытым вопрос о возможности и условиях реализации ячеистой структуры в жидких ВВ [7], поскольку в результате потери устойчивости ламинарное одномерное течение в зоне реакции становится турбулентным и формирование каких-либо упорядоченных структур не очевидно. В этой связи актуальной является задача непосредственной регистрации свечения фронта неустойчивой детонации с использованием высокоскоростных регистраторов в покадровом режиме, что непосредственно де-

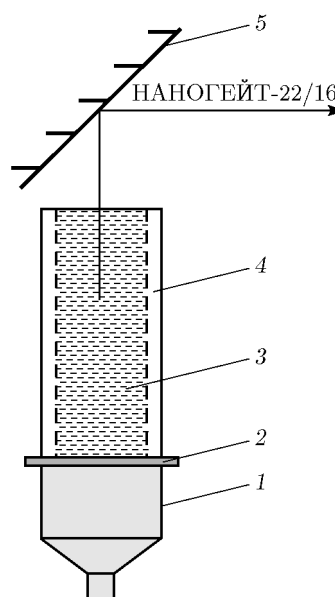


Рис. 3. Схема экспериментов:

1 — инициирующий заряд ВВ, 2 — экран, 3 — исследуемое ВВ, 4 — оболочка, 5 — поворотное зеркало

монстрирует пространственное распределение неоднородностей и характер их изменения во времени. В данной работе эта методика применена для исследования неустойчивого детонационного фронта в жидких ВВ на основе нитрометана (НМ), тетранитрометана (ТНМ) и бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль (ФИФО).

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов приведена на рис. 3. Иницирование детонации осуществлялось зарядом ВВ, состоящим из генератора плоской ударной волны и прессованного заряда из флегматизированного гексогена плотностью 1.6 г/см^3 , скорость детонации и давление в котором равны 8 км/с и 25 ГПа соответственно. Высота заряда составляла 40 мм , а диаметр изменялся от 40 до 80 мм в зависимости от диаметра оболочки с жидким ВВ (1). Формирование ударной волны и отсечение продуктов детонации осуществлялось стальным экраном толщиной 1 мм (2). Исследуемое жидкое ВВ (3) помещалось в цилиндрическую оболочку из ПММА, полипропилена или стали (4) с внутренним диаметром $36 \div 56 \text{ мм}$ и длиной 150 мм . Проведенные ранее эксперименты [16, 17] показали, что стационарная структура детонационного фронта в данной по-

становке устанавливается на расстоянии менее 100 мм от экрана. Авторы [16] с использованием интерферометра VISAR определили, что в нитрометане изменение длины заряда от 80 до 280 мм не приводит к изменению волновых профилей. Это свидетельствует о том, что стационарная детонация устанавливается на длине менее 80 мм. Аналогичный вывод можно сделать, анализируя результаты работы [17], авторы которой исследовали ударно-волновое инициирование детонации в ТНМ и его смесях с инертными разбавителями. Регистрация осуществлялась высокоскоростными камерами, работающими в щелевом и кадровом режимах. На представленных в [17] снимках видно, что, несмотря на сложный характер инициирования детонации и широкий интервал периода индукции теплового взрыва, изменяющегося в зависимости от состава смеси от 0.1 до 2 мкс, спустя примерно 10 мкс (что соответствует длине заряда около 60 мм) устанавливается стационарная детонация. Поэтому в данной работе регистрация свечения детонационного фронта проводилась на базе $100 \div 150$ мм.

Свечение фронта наблюдалось через поворотное зеркало 5, установленное над верхним срезом кюветы под углом 45° . Свечение регистрировалось скоростной восьмиканальной шестнадцатикадровой электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-22/16 с выдержкой 10 нс на кадр, с временным интервалом между кадрами от наносекунд до микросекунд. Пространственное разрешение методики равно примерно 100 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нитрометан/ацетон

Наиболее изученными жидкими ВВ являются нитрометан и его смеси с различными инертными разбавителями. Показано, что даже небольшие добавки недетонирующих жидкостей приводят к потере устойчивости детонационного фронта [7]. Вопрос об устойчивости фронта в чистом НМ остается открытым, поскольку утверждение о его неустойчивости основано на косвенных данных и столь же аргументированным является обратное утверждение [18]. В данной работе исследовалась смесь НМ с ацетоном (Ац) в массовом соотношении 80/20 %. Плотность ρ_0 , скорость детонации D ,

Детонационные параметры исследованных смесей

Состав, %	ρ , г/см ³	D , км/с	$p_{чж}$, ГПа	Источник
НМ/Ац 80/20	0.790	5.50 ± 0.02	6.3 ± 0.1	[14]
ТНМ/М 50/50	1.07	5.91 ± 0.02	10.9 ± 0.2	[15]
ТНМ/М 45/55	1.04	5.66 ± 0.02	9.8 ± 0.2	[15]
ФИФО/М 70/30	1.22	5.78 ± 0.03	11.0 ± 0.2	[18]

давление $p_{чж}$ в точке Чепмена — Жуге этой смеси, а также других исследованных составов представлены в таблице.

Использовалась стальная оболочка с внутренним диаметром 36 мм и внешним — 40 мм. Получено 16 кадров с временным интервалом между ними 50 нс, за исключением перехода от 8-го кадра к 9-му, при котором временная задержка увеличивается на 4350 нс, что обусловлено техническими особенностями камеры. Некоторые результаты регистрации свечения детонационного фронта приведены на рис. 4, 5.

На рис. 4 для наглядности один из кадров представлен в увеличенном виде. Отчетливо видно формирование неоднородной структуры, состоящей из светлых областей, ограниченных темными границами. Характерный размер

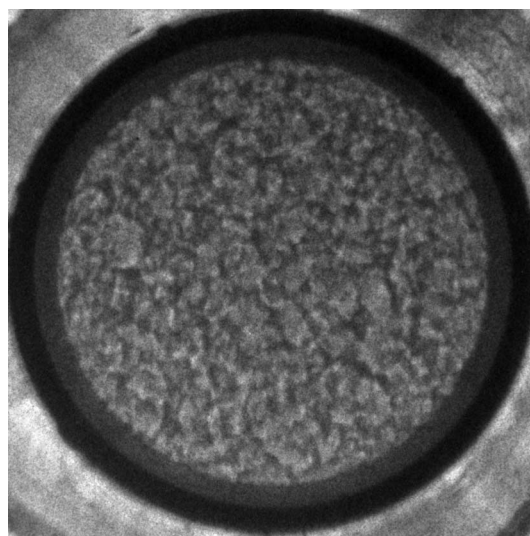


Рис. 4. Снимок свечения неустойчивого детонационного фронта в смеси НМ/Ац 80/20

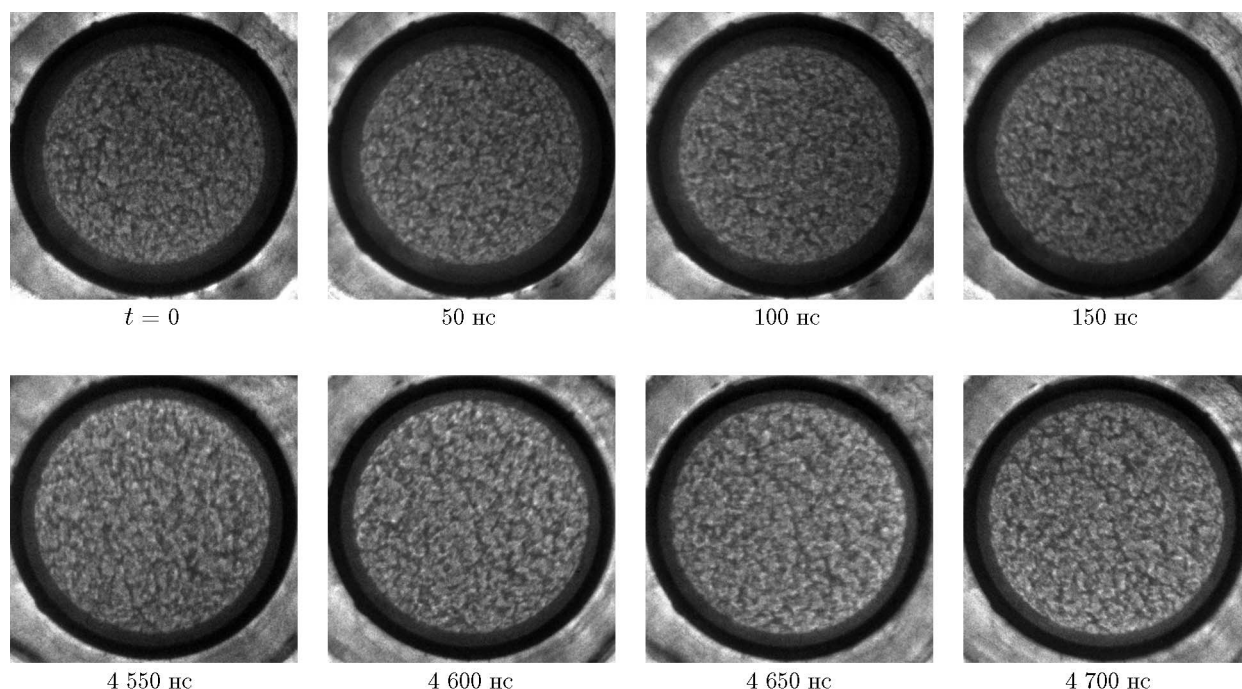


Рис. 5. Свечение детонационного фронта в смеси НМ/Ац 80/20 в различные моменты времени (время отсчитывается от первого кадра)

неоднородностей изменяется в достаточно широком интервале — примерно $1 \div 5$ мм. Причем эту величину следует считать оценкой сверху, поскольку свечение этих областей неоднородно. Наиболее существенным, однако, является тот факт, что наблюдаемое неоднородное свечение крайне сложно согласовать с модельными представлениями о ячеистой структуре детонации с определяющей ролью поперечных детонационных волн, которые должны, в частности, проявляться на снимке в виде ярких, а не темных полос. То есть снимок, вероятно, был бы в большей степени похож на негатив кадра, приведенного на рис. 4.

На рис. 5 показаны четыре первых и четыре последних кадра эволюции неоднородностей детонационного фронта во времени. Выделить смещение какой-либо особенности в поперечном направлении достаточно сложно, поскольку светлые и темные области постоянно меняют форму, «разрушаются» и вновь возникают без явного проявления каких-либо закономерностей. Причем такой турбулентный характер течения сохраняется во всем интервале смещения детонационного фронта. В этой связи регистрация сетки линий камерой в режиме щелевой развертки (см. рис. 1) кажется достаточно неожиданной. Тем не менее, качествен-

ную картину формирования «сетки» можно получить в результате обработки зарегистрированных кадров. С этой целью из центральной части первых восьми снимков, полученных через 50 нс, вертикальной щелью шириной 1 мм были вырезаны изображения, результат совмещения которых приведен на рис. 6. Из-за большого временного интервала между восьмым и девятым кадрами последующие восемь кадров не использовались.

На рис. 6 действительно наблюдаются темные полосы, которые имеют различный наклон, формально соответствующий «движению» особенности вдоль фронта со скоростью ≈ 5 км/с. Следует, однако, отметить, что полоса формируется как смещением во времени фиксированной неоднородности, так и переходом от одной особенности к другой. Поэтому говорить о скорости можно лишь как о формальной величине. Прямое сопоставление представленного на рис. 6 результата с щелевой разверткой, приведенной на рис. 1, невозможно по многим причинам, и не только из-за различия в масштабах времени. При покадровой съемке и при щелевой развертке используются принципиально различные камеры, отличающиеся не только пространственно-временными характеристиками, но и способом получения

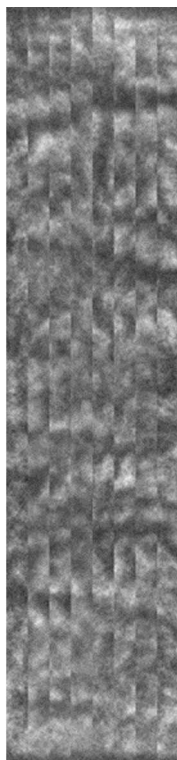


Рис. 6. Формирование полос в результате совмещения изображений, полученных при вырезании вертикальной щелью центральной части из первых восьми кадров

изображения. В первом случае это электронно-оптический преобразователь, во втором — регистрация на фотопленку. Кроме того, при щелевой развертке изображение формируется быстро вращающимся внутри камеры зеркалом, что совместно с меньшим временным разрешением методики приводит к большему размытию картины. Тем не менее возможность получения «упорядоченной структуры полос» из хаотической осцилляции неоднородностей выглядит достаточно убедительно.

Тетранитрометан/метанол

Тетранитрометан — жидкое ВВ с начальной плотностью 1.64 г/см^3 и скоростью детонации $D = 6.48 \text{ км/с}$ [15, 19]. Его отличительной особенностью является положительный кислородный баланс, равный 49 %, поэтому смеси ТНМ с инертными разбавителями детонируют в широком диапазоне концентраций. Так, например, предельная концентрация метанола (М), выше которой детонация не распространяется, равна 62 % [15]. При-

чем детонационные волны устойчивы до содержания метанола 40 %, и отчетливо выраженные осцилляции массовой скорости появляются лишь при более высокой концентрации [15]. При этом размер неоднородностей оказывается небольшим, порядка 100 мкм, что делает достаточно проблематичным использование высокоскоростной камеры для их регистрации. В качестве примера на рис. 7 приведено несколько снимков детонационного фронта в смеси ТНМ/М 50/50. Временной интервал между кадрами составляет 1 мкс. Использовалась полипропиленовая оболочка с внутренним диаметром 36 мм. На первых двух кадрах регистрируется однородное свечение детонационного фронта, несмотря на то, что в данной смеси детонация неустойчива [15], вследствие ограниченного пространственного разрешения камеры. Тем не менее факт существования неустойчивости может быть установлен с помощью этой методики.

Известно, что при выходе на свободную поверхность детонационной волны с устойчивым фронтом свечение продуктов взрыва остается гладким, тогда как при наличии неустойчивости наблюдается характерное струеобразование (см. рис. 1). Аналогичный метод для установления факта неустойчивости детонации в смеси ТНМ/М 50/50 может быть использован и при кадровой регистрации свечения. На рис. 7 на кадре, соответствующем времени $t = 6 \text{ мкс}$, зарегистрирован момент выхода детонационной волны на свободную поверхность. Поскольку на краю заряда детонационный фронт искривлен, сначала на свободную поверхность выходит центральная его часть, которая отражается на рисунке более темным кругом. Следующий кадр (7 мкс) соответствует разлету продуктов взрыва в воздух при полном выходе детонационной волны на свободную поверхность. Неоднородное свечение в данном случае проявляется отчетливо и обусловлено, как уже отмечалось, неустойчивостью фронта. Установить связь характерных размеров наблюдаемых неоднородностей с поперечным размером неоднородностей во фронте не представляется возможным из-за сложной динамики разлета продуктов взрыва со свободной поверхности. Однако факт потери устойчивости детонационной волны очевиден.

Дальнейшее увеличение концентрации метанола до 55 % приводит к отчетливой регистрации неустойчивости детонационного фрон-

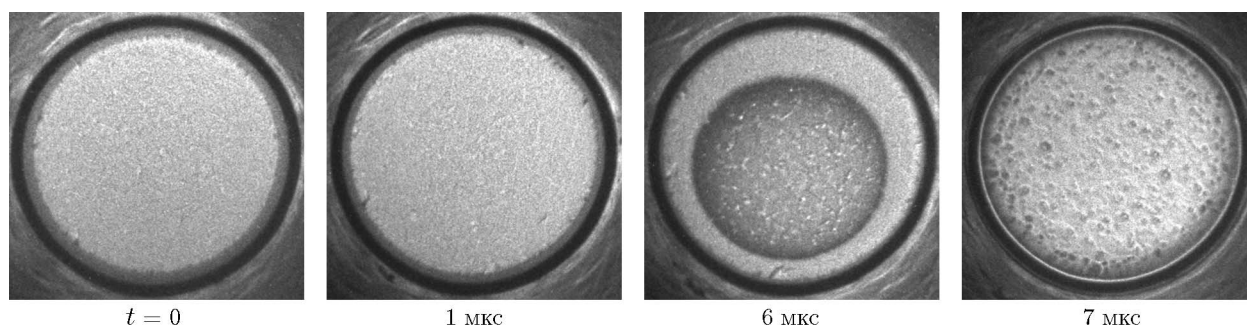


Рис. 7. Свечение детонационного фронта в смеси ТНМ/М 50/50:

кадры $t = 6$ и 7 мкс — выход детонации на свободную поверхность

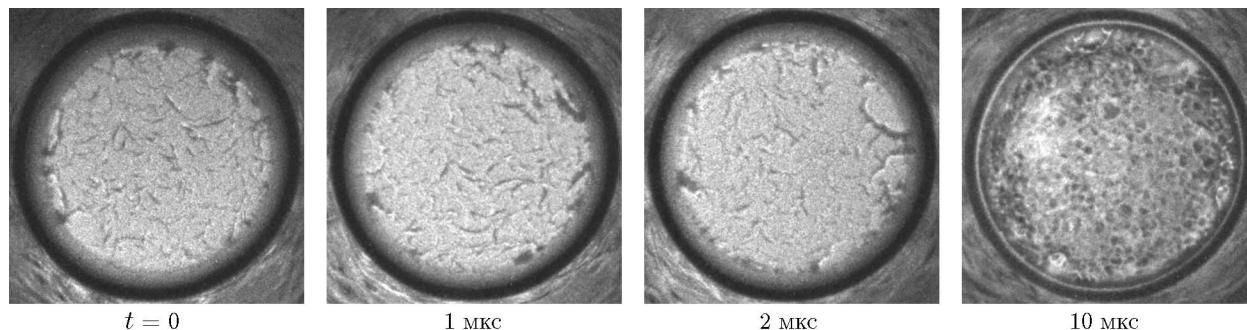


Рис. 8. Свечение детонационного фронта в смеси ТНМ/М 45/55:

кадр $t = 10$ мкс — выход детонации на свободную поверхность

та (рис. 8), структура которой заметно отличается от наблюдаемой в НМ/Ац (см. рис. 5). В данном случае неоднородности наиболее отчетливо проявляются в виде темных полос длиной порядка $1 \div 5$ мм на светлом фоне. При переходе от одного кадра к другому расположение полос, форма и количество меняются столь значительно, что сложно определить характер их эволюции во времени. Возможно, это связано с большим интервалом времени между кадрами, равном 1 мкс.

Следует отметить, что между темными областями свечение фронта не является однородным, а имеет некоторую, более мелкую структуру, которая отчетливо видна при выходе детонационной волны на свободную поверхность (кадр 10 мкс на рис. 8). При этом характер свечения продуктов взрыва практически совпадает с аналогичным результатом для концентрации метанола 50 % (кадр 7 мкс на рис. 7). Поэтому нельзя исключать тот факт, что резкое увеличение характерных размеров неоднородностей при изменении концентрации метанола от 50 до 55 % обусловлено не сильной зависимостью их размеров от разбавителя,

а развитием новой крупномасштабной неустойчивости, которая проявляется в виде темных полос.

ФИФО/метанол

Бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль (ФИФО, ФК, $C_5H_6N_4O_{10}F_2$), как и ТНМ, является мощным жидким ВВ с начальной плотностью 1.60 г/см^3 и скоростью детонации $D = 7.5 \text{ км/с}$ [18, 20]. Однако в отличие от ТНМ он имеет отрицательный кислородный баланс (-10%), поэтому добавки разбавителей снижают его детонационные параметры. Так, например, предельная концентрация метанола в смеси ФИФО/М равна 32 % [20]. Необычной является смена устойчивых и неустойчивых режимов распространения детонационного фронта при изменении концентрации метанола. Авторами [20] показано, что в чистом ФИФО и при концентрации метанола менее 10 % детонация неустойчива. В диапазоне $10 \div 15 \%$ фронт стабилизируется, и, только когда концентрация метанола достигает 20 % и более, течение вновь становится неустойчивым. Столь неожиданный характер влияния

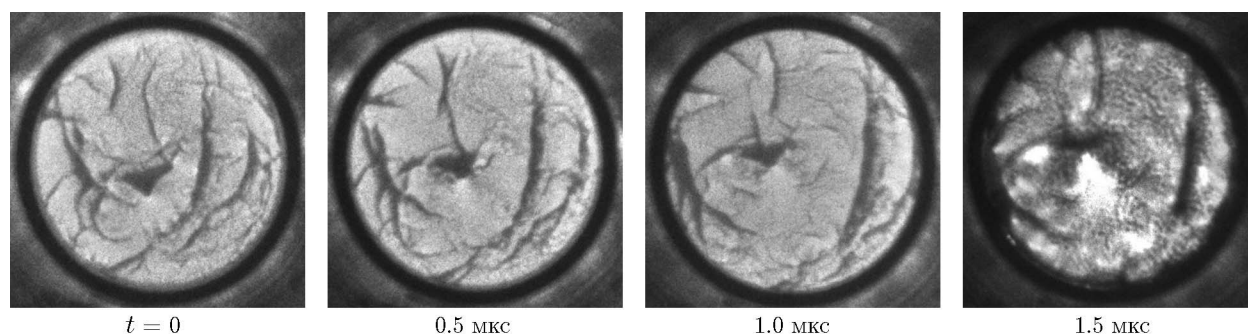


Рис. 9. Свечение детонационного фронта в смеси ФИФО/М 70/30:
кадр $t = 1.5$ мкс — выход детонации на свободную поверхность

разбавителя на устойчивость детонации смеси обусловлен, по мнению авторов работы [20], возможностью реакции ФИФО непосредственно во фронте ударной волны.

При малых концентрациях метанола (менее 10 %) характерный размер неоднородностей не превышает 100 мкм, что не позволяет зарегистрировать их высокоскоростной камерой. Однако при концентрации выше 20 % метанола пульсации резко возрастают и структура неустойчивого детонационного фронта становится доступной для наблюдения. На рис. 9 приведены кадры свечения детонации в смеси ФИФО/М 70/30, помещенной в стальную оболочку с внутренним диаметром 36 мм. Временной интервал между кадрами составляет 0.5 мкс.

Наблюдаемая на рис. 9 структура детонационного фронта принципиально отличается от приведенных выше снимков для НМ и ТНМ. В данном случае неоднородности выглядят как темные крупномасштабные области, сопоставимые по размерам с диаметром заряда, и их количество относительно невелико. Они деформируются во времени и смещаются в поперечном направлении с характерной скоростью ≈ 5 км/с.

Как и в случае с ТНМ, между темными областями свечение фронта не является однородным и имеет мелкомасштабную структуру, которая отчетливо проявляется при выходе детонационной волны на свободную поверхность (кадр 1.5 мкс на рис. 9). Вероятно, именно эта мелкомасштабная структура обусловлена неустойчивостью одномерной детонации, тогда как возникновение крупномасштабной неустойчивости может быть связано с влиянием оболочки заряда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показывают, что структура неустойчивого детонационного фронта определяется в основном индивидуальными характеристиками жидких ВВ. При этом ни в одном из исследованных составов не зарегистрировано течение, соответствующее реализации ячеистой структуры, при которой определяющую роль играет реакция ВВ в косых и поперечных детонационных волнах, задающих границы ячеек [7]. Казалось бы, наиболее близка к такой модели должна быть картина, наблюдаемая в смеси НМ/Ац (см. рис. 4, 5), однако, как отмечалось при обсуждении рис. 4, это не так: отсутствуют ярко светящиеся границы, не обнаружено каких-либо закономерностей в изменении размеров неоднородностей, которые должны быть при возникновении классической ячеистой структуры.

Представляет интерес сравнить характерные размеры неоднородностей с зоной химической реакции. В работе [7] показано, что ширина химика в смеси НМ/Ац 75/25 составляет 1.6 мм, а при 10 % ацетона она равна 0.4 мм [14]. Поэтому с хорошей степенью достоверности ширина зоны реакции в исследованной смеси 80/20 равна примерно 1 мм, т. е. такая же, как и поперечный размер неоднородностей. Поскольку амплитуда пульсаций на порядок меньше их поперечного размера [7], то это означает, что неоднородное свечение детонационного фронта (см. рис. 4, 5) связано с потерей устойчивости одномерного течения непосредственно внутри зоны реакции. Этот вывод полностью согласуется с теоретическими результатами исследования устойчивости детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга [2, 5–11].

Результатом неустойчивости является развитие турбулентного течения в зоне реакции, что вызывает неоднородное свечение детонационного фронта. При этом вопрос о возможности и условиях формирования упорядоченных структур, какими являются ячейки с косыми и поперечными детонационными волнами, остается открытым.

В смесях на основе ТНМ и ФИФО структура неустойчивого детонационного фронта усложняется возможностью одновременной реализации неоднородностей различного масштаба. Особенно ярко это выражено в смеси ФИФО/М (см. рис. 9). Вероятно, мелкомасштабные неоднородности соответствуют потере устойчивости одномерного детонационного фронта, тогда как появление крупных неоднородностей обусловлено конечным диаметром заряда. Исследование влияния диаметра на структуру неустойчивого детонационного фронта представляет несомненный интерес, но осложняется необходимостью проведения экспериментов с зарядами большого диаметра, поскольку неустойчивость проявляется лишь при приближении к предельной концентрации разбавителя, что сопровождается резким увеличением критического диаметра детонации.

Следует отметить качественно совпадающий характер изменения размеров наблюдаемых неоднородностей в жидких ВВ и ячеистых структур в газовых смесях по мере приближения к критическим параметрам детонации. Так, например, рост содержания разбавителя в жидких ВВ приводит к увеличению размеров неоднородностей (см. рис. 8, 9), что становится особенно заметным при приближении к предельной концентрации (рис. 9). Столь же значительный рост ячеек отмечается в газовых смесях вблизи предела распространения детонации [1].

Схожесть турбулентного течения с ячеистыми структурами при регистрации с торца заряда с помощью щелевой развертки проявляется в виде сетки линий в обоих случаях. В то же время различие отчетливо наблюдается при кадровой съемке. При сопоставлении последовательности кадров видно, что неоднородности непрерывно разрушаются и вновь возникают без каких-либо явных закономерностей, которые следовало бы ожидать в случае ячеистой структуры. Тем не менее, поскольку основную роль в турбулентном потоке играют крупно-

масштабные пульсации [21], можно говорить о характерном размере неоднородностей.

Турбулентное течение, возникающее в результате потери устойчивости одномерной детонации, не означает, что в жидких ВВ ячеистые структуры вообще не реализуются. Яркий пример возникновения и эволюции ячеек наблюдался в [17] при ударно-волновом инициировании детонации в смесях ТНМ с инертными разбавителями. Неустойчивость теплового взрыва приводит к очаговому характеру инициирования детонации, и при взаимодействии детонационных волн, распространяющихся из различных очагов, формируются ячеистые структуры, которые исчезают по мере развития детонации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с Институтом органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН № 075-15-2020-803).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчийн 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. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // ЖЭТФ. — 1940. — Т. 10, № 5. — С. 542–568.
5. Зайдель Р. М. Об устойчивости детонационных волн в газовых смесях // Докл. АН СССР. — 1961. — Т. 136, № 5. — С. 1142–1145.
6. Асланов С. К., Будзировский В. Н., Шелкин К. И. Исследование газодинамической устойчивости детонационной волны произвольного профиля // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 182, № 1. — С. 53–55.
7. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.

8. **Short M.** Theory and modeling of detonation wave stability: A brief look at the past and toward the future // Proc. of the 20th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Montreal, 2005.
9. **Stewart D. S., Kasimov A. R.** State of detonation stability theory and its application to propulsion // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1230–1244. — DOI: 10.2514/1.21586.
10. **Powers J. M.** Review of multiscale modeling of detonation // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1217–1229. — DOI: 10.2514/1.17897.
11. **Ng H. D., Zhang F.** Detonation instability // Shock Waves Science and Technology Library. V. 6: Detonation Dynamics. — Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. — P. 107–212.
12. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И.** Определение детонационных параметров жидких взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 72–77. — EDN: NWCWUP.
13. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Колдунов С. А.** Неустойчивость детонационных волн в нитрометане и ФИФО // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 87–93. — DOI: 10.15372/FGV20150412. — EDN: UHCLBD.
14. **Мочалова В. М., Уткин А. В.** Стабилизация неустойчивых детонационных волн в смесях нитрометана с инертными разбавителями // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 130–137. — DOI: 10.15372/FGV20160215. — EDN: VVYHVP.
15. **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/FGV2020050. — EDN: VOEHND.
16. **Mochalova V., Utkin A., Shakula M., Lavrov V., Savchenko A., Yakushev V.** Reaction zone structure and detonation parameters of nitromethane/polymethylmethacrylate and its mixture with microballoons // Phys. Fluids. — 2021. — V. 33, N 4. — 046108. — DOI: 10.1063/5.0048210.
17. **Рапота Д. Ю., Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Сосиков В. А.** Особенности ударно-волнового инициирования детонации в жидких взрывчатых веществах // Физика горения и взрыва. — 2023. — Т. 59, № 4. — С. 111–121. — DOI: 10.15372/FGV2022.9270. — EDN: GKBNMY.
18. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Гарагин В. А.** Исследование структуры детонационных волн в нитрометане и смеси нитрометан/метанол // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 115–121. — EDN: UHYSWD.
19. **Зотов Е. В.** Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2004.
20. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Колдунов С. А.** Неустойчивость детонационных волн в растворах ФИФО/метанол // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 84–91. — DOI: 10.15372/FGV20170111. — EDN: XRPDLZ.
21. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.

Поступила в редакцию 04.09.2023.

После доработки 09.10.2023.

Принята к публикации 08.11.2023.