

УДК 534.222.2

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В СМЕСЯХ ТЕТРАНИТРОМЕТАНА С АЦЕТОНОМ

А. В. Уткин¹, В. М. Мочалова¹, А. М. Астахов², В. Е. Рыкова¹,
В. А. Сосиков¹, Д. Ю. Рапота¹, С. И. Торунов¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, utkin@icp.ac.ru

² Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва, 660037 Красноярск

С использованием интерферометра VISAR и электронно-оптической камеры НАНОГЕЙТ-22 проведены экспериментальные исследования структуры детонационных волн в смесях тетранитрометана с ацетоном. Показано резкое изменение характера течения в зоне реакции при концентрации разбавителя $10 \div 40$ %, проявляющееся в уменьшении амплитуды химпика вплоть до его полного исчезновения. Практически во всем интервале концентраций, за исключением диапазона вблизи предельного значения 52 %, детонационные волны устойчивы. При приближении к предельной концентрации они теряют устойчивость, что проявляется в формировании как ячеистой структуры фронта, так и волн срыва реакции. Полученные экспериментальные зависимости скорости детонации от концентрации ацетона хорошо согласуются с термодинамическими расчетами.

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

DOI 10.15372/FGV2022.9209

ВВЕДЕНИЕ

Особенности детонации жидких взрывчатых веществ (ВВ) определяются прежде всего энергией активации и тепловым эффектом реакции, которые можно варьировать в широком диапазоне посредством добавления инертных и химически активных жидкостей. Это позволяет получить информацию о влиянии кинетики химических реакций на структуру детонационных волн и предельные режимы детонации. Настоящая работа является продолжением исследований жидких ВВ на основе тетранитрометана (ТНМ), выполненных ранее для смесей с метанолом (М) и нитробензолом (НБ) [1–3]. В данной работе в качестве разбавителя используется ацетон (Ац). Поскольку ТНМ является сильным окислителем с положительным кислородным балансом (КБ), равным 49 %, то добавки горючего, каковым, наряду с метанолом и нитробензолом, является

ацетон, позволяют изменять теплоту взрыва, а следовательно, и параметры детонации смеси [4]. Можно ожидать, что добавки ацетона приведут к существенному изменению структуры зоны реакции, как это наблюдалось в смесях ТНМ/М и ТНМ/НБ [1–3]. Кроме того, авторы [1–7] отмечают плохую воспроизводимость экспериментальных данных в смесях ТНМ/М и ТНМ/НБ в окрестности стехиометрической концентрации разбавителей. Причины этого явления остаются неясными, и в такой ситуации актуальным представляется экспериментальное исследование влияния различных факторов, в том числе и природы разбавителя, на характер воспроизводимости волновых профилей. Вызывает интерес также определение интервала концентраций ацетона, в котором возможна потеря устойчивости детонационных волн, проявляющаяся в формировании ячеистой структуры фронта и волн срыва реакции [8]. Исследованию этих закономерностей в смесях ТНМ/Ац посвящена данная работа.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментов показана на рис. 1. Детонация в исследуемом ВВ инициировалась

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

© Уткин А. В., Мочалова В. М., Астахов А. М.,
Рыкова В. Е., Сосиков В. А., Рапота Д. Ю.,
Торунов С. И., 2023.

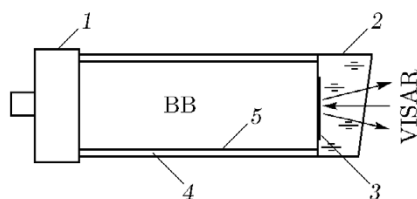


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — инициирующее ВВ, 2 — водяное окно, 3 — алюминиевая фольга, 4 — оболочка, 5 — ионизационный датчик

плосковолновым генератором 1 из прессованного заряда флегматизированного гексогена. Регистрация волновых профилей осуществлялась многоканальным интерферометром VISAR. Для определения абсолютной величины скорости одновременно применялись два интерферометра с различными постоянными: 280 и 1 280 м/с. Зондирующее излучение отражалось от 7-микронной алюминиевой фольги 3, расположенной между торцом заряда и водяным окном 2. Исследуемое жидкое ВВ помещалось в оболочки 4 из полипропилена, ПММА и стали с внутренним диаметром от 28 до 56 мм. Длина заряда составляла 150 мм.

Одновременно с массовой скоростью в каждом эксперименте измерялась скорость детонации D , для чего использовался датчик 5 как точка отсчета времени. Вторая метка времени соответствовала началу регистрации массовой скорости интерферометром. Погрешность определения D составляла $\pm 0.4\%$.

Для исследования характера возникновения и эволюции волн срыва реакции использовались оптические методы регистрации свечения детонационного фронта. Схема экспериментов аналогична приведенной на рис. 1, но сборка располагалась вертикально и поверхность исследуемого ВВ оставалась свободной. Водяное окно 2 и алюминиевая фольга 3 отсутствовали. Свечение детонационного фронта регистрировалось восьмиканальной электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-22/16, позволяющей получить 16 кадров с временем экспозиции 10 нс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Структура волновых профилей

Результаты экспериментов для смеси ТНМ/Ац представлены в табл. 1, где указаны состав смеси; плотность ρ_0 , рассчитанная

Таблица 1

Экспериментальные параметры детонации смеси ТНМ/Ац

ТНМ/Ац, % (мас.)	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$u_{СЖ}$, км/с	$p_{СЖ}$, ГПа
100/0	1.64	6.48	1.55 ± 0.02	16.5 ± 0.2
95/5	1.55	6.69	1.75 ± 0.03	18.1 ± 0.3
90/10	1.48	6.86	1.91 ± 0.03	19.4 ± 0.3
85/15	1.41	6.97	2.00 ± 0.04	19.6 ± 0.4
82/18	1.37	6.99	2.03 ± 0.04	19.4 ± 0.4
80/20	1.35	6.98	2.06 ± 0.04	19.4 ± 0.4
78/22	1.33	6.97	2.06 ± 0.04	19.1 ± 0.4
75/25	1.29	6.86	2.10 ± 0.04	18.6 ± 0.4
70/30	1.24	6.64	1.94 ± 0.03	16.0 ± 0.3
65/35	1.19	6.24	1.81 ± 0.03	13.4 ± 0.3
60/40	1.15	5.96	1.73 ± 0.03	11.9 ± 0.3
55/45	1.10	5.68	1.64 ± 0.03	10.2 ± 0.3
50/50	1.07	5.31	1.60 ± 0.03	9.1 ± 0.2
48/52	1.05	5.18	1.44 ± 0.03	7.8 ± 0.2
47/53	1.04	3.46	—	—
45/55	1.03	3.00	—	—

аддитивным методом; скорость детонации D ; массовая скорость $u_{СЖ}$ и давление $p_{СЖ}$ в точке Чепмена — Жуке (ЧЖ). В экспериментах использовался ТНМ ($C(NO_2)_4$) плотностью 1.64 г/см^3 со скоростью детонации 6.48 км/с и ацетон (C_2H_6O) плотностью 0.79 г/см^3 . Для каждой концентрации Ац было выполнено 3–10 опытов. Осредненные значения D , $u_{СЖ}$ и $p_{СЖ}$ приведены в табл. 1.

Характерные профили скорости на границе с водой при различной массовой концентрации Ац приведены на рис. 2, 3. В чистом ТНМ профиль скорости соответствует представлениям классической теории детонации: за ударным скачком скорость уменьшается и в зоне реакции формируется химпик. Параметры химпика определяются в результате анализа ударно-волновых взаимодействий в плоскости давление p — массовая скорость u и равны $p_N = 26.5 \pm 0.6 \text{ ГПа}$ и $u_N = 2.52 \pm 0.06 \text{ км/с}$ [1]. Переход от зоны реакции к волне разгрузки не приводит к появлению каких-либо особенностей на профиле скорости, что делает неопре-

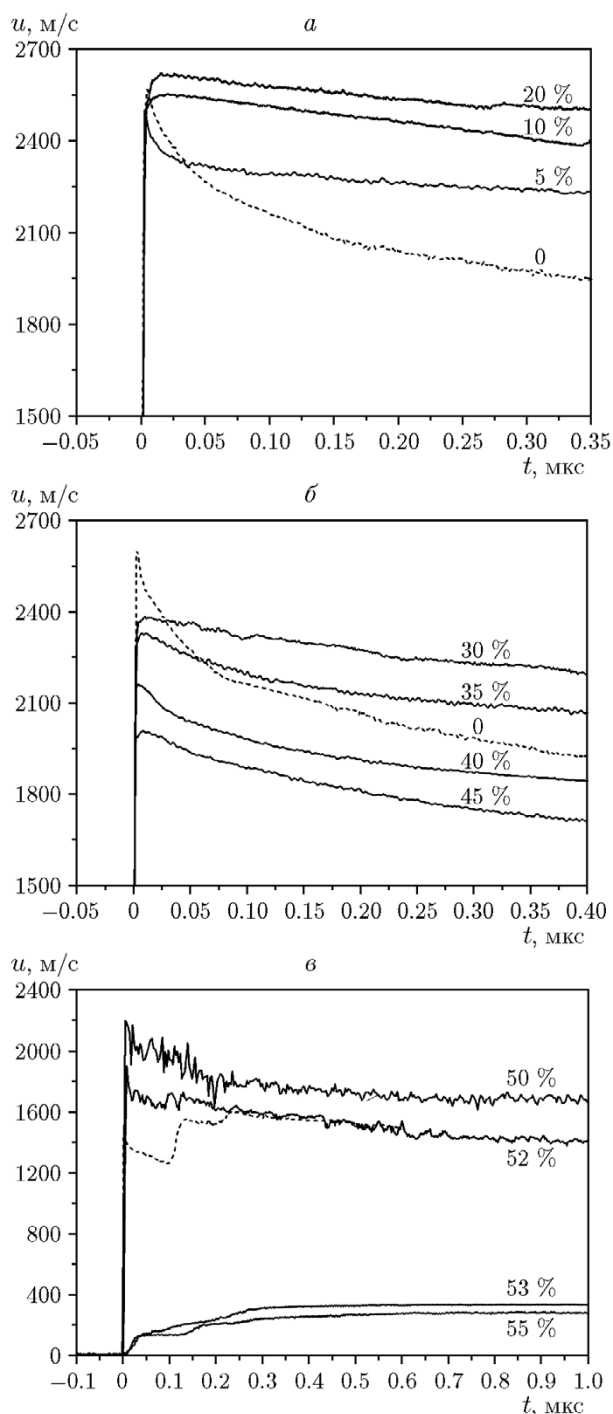


Рис. 2. Профили массовой скорости смеси ТНМ/Ац на границе с водой в интервалах концентрации Ац, в которых параметры детонации возрастают (а), уменьшаются (б), находятся в окрестности критической концентрации Ац (в)

деленным положение точки ЧЖ. В работе [9] было показано, что время реакции для ТНМ равно 175 ± 25 нс. Это позволяет определить массовую скорость и давление в точке ЧЖ, ко-

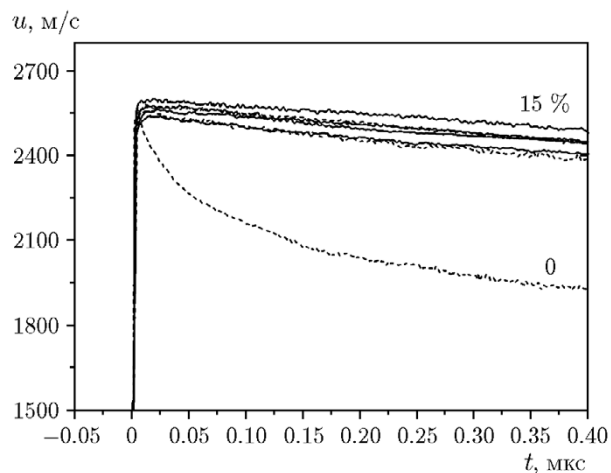


Рис. 3. Профили массовой скорости, полученные в различных экспериментах при фиксированном составе смеси ТНМ/Ац 85/15

торые равны 1.55 ± 0.02 км/с и 16.5 ± 0.2 ГПа соответственно. Полученные значения хорошо согласуются с данными авторов [5, 8, 10].

При добавлении ацетона существенно изменяются как параметры, так и структура детонационных волн. Во-первых, с увеличением концентрации Ац возрастают давление и массовая скорость, что является ожидаемым результатом и связано с увеличением теплоты взрыва смеси [4]. Причем максимальные значения достигаются в окрестности стехиометрической концентрации, равной 81.8/18.2 %. При концентрации ацетона, превышающей 20 %, детонационные параметры уменьшаются, оставаясь тем не менее выше, чем в чистом ТНМ, вплоть до 30 %. Критическая концентрация ацетона, выше которой детонация в смеси ТНМ/Ац не распространяется, равна $C_{cr} = 52$ %. Поэтому профили скорости, приведенные на рис. 2, в и в табл. 1 для концентраций ацетона 53 и 55 %, соответствуют ударным волнам, распространяющимся по смеси после затухания детонации. В табл. 1 для этих концентраций массовая скорость и давление не указаны, а приведенное значение D относится к средней скорости распространения ударных волн.

Во-вторых, при концентрации ацетона, не превышающей 45 %, регистрируемые профили скорости являются достаточно гладкими, без каких-либо осцилляций (рис. 2, а, б). Это означает, что детонационные волны в чистом ТНМ и его смесях с ацетоном устойчивы по отношению к возмущениям, приводящим к формированию ячеистой структуры. Дальнейшее

увеличение концентрации ацетона приводит к появлению осцилляций на профилях скорости, что свидетельствует о неустойчивости детонационного фронта. Зависимость массовой скорости от времени, приведенная на рис. 2,6 для смеси ТНМ/Ац 50/50, получена в опытах с использованием 7-микронной алюминиевой фольги для отражения лазерного излучения. Надежная регистрация скорости в течение достаточно длительного времени означает, что амплитуда возмущений детонационного фронта меньше 7 мкм. В противном случае наблюдалась бы заметная деформация фольги, что привело бы к резкому изменению интенсивности отраженного лазерного излучения и невозможности регистрации скорости движения границы ВВ — водяное окно. При увеличении концентрации ацетона до 52 % осцилляции скорости сохраняются и их амплитуда остается практически неизменной, что позволяет проводить регистрацию волновых профилей с использованием 7-микронной фольги. Увеличение толщины фольги до 400 мкм полностью сглаживает колебания, что видно на рис. 2,6 на профиле скорости для смеси ТНМ/Ац 48/52 (пунктирная линия). Применение толстой фольги позволяет осуществлять регистрацию течения при наличии крупномасштабных пульсаций, но при этом заметно усложняется анализ получаемых зависимостей. Так, например, на рис. 2,6 резкий подъем скорости на пунктирной кривой через 100 нс после ударного скачка обусловлен реверберацией волн сжатия и разрежения в фольге и не связан со структурой детонационной волны. Следует отметить, что потеря устойчивости детонационного фронта наблюдается лишь вблизи критической концентрации ацетона C_{cr} .

Наиболее яркой особенностью волновых профилей в смеси ТНМ/Ац является резкое снижение амплитуды химпика в зоне реакции вплоть до его полного исчезновения. При 5 % ацетона химпик выражен отчетливо, но его амплитуда в несколько раз меньше, чем в чистом ТНМ. Начиная с 10 %, говорить о химпике в зоне реакции вообще не приходится, поскольку за ударным фронтом массовая скорость продолжает возрастать, примерно при 10 нс она достигает максимума и только затем начинает уменьшаться (см. рис. 2,а,б). Причем градиент скорости остается практически постоянным, из-за чего невозможно даже приблизительно определить положение точки ЧЖ. Оче-

видно лишь, что время реакции уменьшается по сравнению со временем в чистом ТНМ, поэтому при расчетах детонационных параметров предполагалось, что время лежит в диапазоне $50 \div 100$ нс. Поскольку в указанном временном интервале скорость изменяется незначительно, это не вносит заметной погрешности в определение детонационных параметров. Только начиная с концентрации ацетона в смеси 40 % (см. рис. 2,б) вновь наблюдается формирование химпика в зоне реакции, хотя его амплитуда меньше, чем в чистом ТНМ. При осреднении осциллирующих профилей скорости, приведенных на рис. 2,6 для концентраций 50 и 52 %, также можно говорить о наличии химпика в этих смесях несмотря на то, что течение в зоне реакции при ячеистой неустойчивости является неоднородным.

Многие авторы отмечают плохую воспроизводимость экспериментальных данных в смесях ТНМ с нитробензолом и метанолом в окрестности стехиометрической концентрации разбавителей [1–6]. Например, в работах [2, 3] разброс амплитудных значений массовой скорости от опыта к опыту достигал 400 м/с. По мнению авторов [6], плохая воспроизводимость обусловлена многостадийностью химических реакций в условиях детонации подобных смесей, в результате чего энерговыделение зависит от многих факторов, влияние каждого из которых трудно определить. В смеси ТНМ/Ац также наблюдается отсутствие воспроизводимости профилей скорости при концентрации ацетона $15 \div 30$ %, но выражено это в значительно меньшей степени. Рис. 3 демонстрирует характерный разброс экспериментальных данных для смесей с 15 % разбавителя. Максимальное расхождение между зависимостями скорости от времени, полученными в шести различных опытах, выполненных в одинаковых условиях, не превышает 100 м/с. При пересчете на параметры в точке ЧЖ это различие уменьшается примерно до 80 м/с, что всего лишь в несколько раз превышает ошибку измерений. Отметим, что в табл. 1 погрешность определения детонационных параметров приведена с учетом характера воспроизводимости волновых профилей.

Одновременно с массовой скоростью в опытах регистрировалась скорость детонации D , зависимость которой от концентрации ацетона приведена на рис. 4. В чистом ТНМ $D = 6.48 \pm 0.02$ км/с. При добавлении ацетона

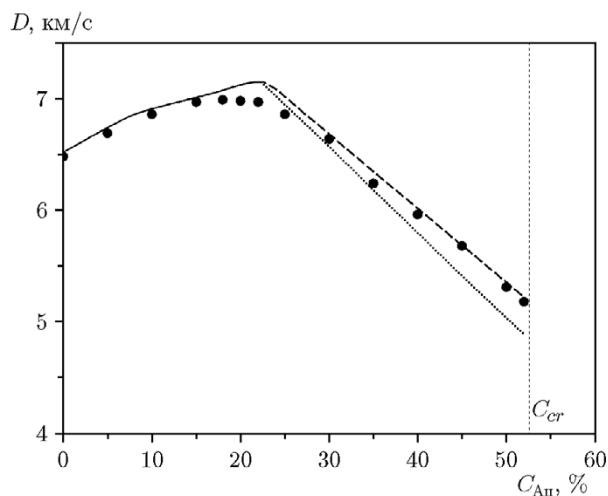


Рис. 4. Зависимость скорости детонации смеси ТНМ/Ац от концентрации ацетона:

точки — эксперимент, линии — термодинамический расчет (BKW-RR); сплошная линия — газообразные продукты детонации, пунктирная — образование углерода в алмазной фазе, штриховая — образование графита

она увеличивается почти до 7 км/с в окрестности стехиометрической концентрации смеси ТНМ/Ац и уменьшается при дальнейшем разбавлении. Минимальная скорость детонации, 5.18 км/с, зарегистрирована при концентрации ацетона 52 %.

Сплошной линией на рис. 4 приведена зависимость D от концентрации ацетона, полученная в термодинамическом расчете. Расчет выполнялся с использованием для газообразных продуктов взрыва уравнения состояния Беккера — Кистяковского — Вильсона (BKW) [11] с различным набором констант: BKW-RDX [11], BKW-RR [12], BKW-C [13] и BKW-NV [14]. Как и ранее [2], наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается при использовании параметров BKW-RR. При отрицательном КБ необходимо учитывать наличие в продуктах детонации конденсированного ультрадисперсного углерода [15], который появляется при содержании ацетона в смеси выше $\approx 22\%$ (КБ $< -11\%$) в алмазной фазе. Наилучшее согласование с экспериментальными данными наблюдается, если считать, что алмазная фаза углерода образуется до концентрации ацетона $\approx 31\%$ (КБ $\approx -34\%$), а затем начинает появляться графит, который становится единственной формой углерода в продуктах детонации после $\approx 47\%$ ацетона (КБ $< -78\%$). Алмаз прини-

мался несжимаемым, а сжимаемость графита описывалась уравнением состояния Коуэна [11, 12, 15].

Полученные расчетные значения детонационных параметров приведены в табл. 2, где T_{CJ} и γ — температура в точке ЧЖ и показатель политропы соответственно. Начиная от концентрации ацетона 22.6 % и выше, первые значения детонационных параметров в табл. 2 соответствуют образованию алмаза в продуктах детонации, вторые — графита. Следует отметить, что совпадение расчетных и экспериментальных значений давления хуже, чем значений скорости детонации. Тем не менее максимальное расхождение, не превышающее 5 %, наблюдается только в окрестности стехиометрии.

Как и ранее для смесей ТНМ/НБ и ТНМ/М [2], расчетные максимумы скорости и давления детонации смещены от стехиометрического соотношения ТНМ/Ац 81.8/18.2 в область с небольшим отрицательным КБ. Но если для первых двух систем это полностью согласуется с экспериментальными данными, то в случае ТНМ/Ац экспериментальный максимум D соответствует стехиометрической смеси, а максимум p_{CJ} наблюдается у состава с небольшим положительным КБ. Во всех случаях максимальная температура T_{CJ} (и теплота взрыва) соответствует стехиометрическим составам.

Волны срыва реакции

Как уже отмечалось, осцилляции профилей скорости на рис. 2,6 обусловлены потерей устойчивости течения в одномерных детонационных волнах, приводящей к формированию ячеистой структуры фронта. В жидких ВВ наблюдается и другой вид неустойчивости, связанный с неоднородностью течения, возникающего в детонационной волне на краю заряда [8]. Квазипериодический процесс, включающий в себя прекращение реакции, вызванное волнами разрежения, накопление нереагирующего слоя вещества и его последующую вспышку, реализуется при распространении детонации в оболочке, сжимаемость которой больше сжимаемости ВВ. Явление прекращения реакции на краю заряда было названо авторами [8] волной срыва реакции.

Существование волны срыва реакции принципиально меняет физическую природу критического диаметра. Как показано в [8],

Таблица 2

Расчетные параметры детонации смеси ТНМ/Ац

ТНМ/Ац, % (мас.)	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$p_{сж}$, ГПа	$T_{сж}$, К	γ
100/0	1.64	6.52	16.2	1 960	3.31
93.1/6.9	1.53	6.83	18.0	3 030	2.95
91/9	1.49	6.89	18.30	3 351	2.88
87.1/12.9	1.44	6.97	18.5	3 923	2.78
83.3/16.5	1.39	7.04	18.6	4 384	2.72
81.8/18.2	1.37	7.08	18.6	4 515	2.70
79.4/20.6	1.34	7.14	18.4	4 361	2.72
78.3/21.7	1.33	7.15	18.2	4 227	2.72
77.4/22.6	1.32	7.13/7.15	18.9/18.1	4 197/4 127	2.55/2.73
76.1/23.9	1.30	7.03/7.09	18.1/18.2	4 114/4 069	2.56/2.60
75/25	1.29	6.95/7.02	17.5/17.7	4 050/4 010	2.57/2.60
73/27	1.27	6.80/6.88	16.4/16.6	3 927/3 895	2.58/2.62
69.2/30.8	1.23	6.51/6.63	14.4/14.9	3 700/3 687	2.62/2.64
62.8/37.2	1.17	6.01/6.20	11.6/12.2	3 320/3 342	2.66/2.69
52.9/47.1	1.09	5.25/5.55	8.2/9.0	2 779/2 847	2.67/2.74
45.8/54.2	1.04	4.74/5.10	6.4/7.2	2 418/2 511	2.64/2.77

критический диаметр в этом случае определяется периодом индукции теплового взрыва на краю заряда, а не временем реакции в детонационной волне, как это предполагается в классической теории [16]. Поэтому исследование возникновения и эволюции волн срыва реакции позволяет судить о характере изменения структуры детонационных волн при приближении к критическим условиям детонации. С этой целью в данной работе электронно-оптической камерой проведена регистрация свечения детонационного фронта смеси ТНМ/Ац в окрестности предельной концентрации ацетона.

На рис. 5 показаны снимки свечения детонационного фронта в смеси ТНМ/Ац 50/50, полученные с интервалом 1 мкс. Волны срыва реакции проявляются как темные области на внутренней границе полипропиленовой оболочки со смесью. Прежде всего, следует отметить очаговый характер возникновения волн. Несмотря на цилиндрическую симметрию, реакция прекращается не по всей окружности одновременно, а в отдельных ее областях. Размер каждой такой области меняется во времени и наблюдается их коллективное движение про-

тив часовой стрелки. В качестве примера на рис. 5 на кадрах 2–5 стрелкой отмечена одна из областей, скорость движения которой вдоль оболочки составляет ≈ 2 км/с.

При обсуждении волновых профилей, приведенных на рис. 2,6, отмечалось, что при 50 % ацетона детонационный фронт теряет устойчивость и формируется ячеистая структура с характерной амплитудой меньше 7 мкм. Авторы [8] показали, что поперечный размер неоднородностей на порядок превышает амплитудные значения, т. е. в исследуемой смеси ТНМ/Ац поперечный размер ячеек меньше 100 мкм. Эта величина находится на границе пространственного разрешения используемой электронно-оптической камеры, поэтому свечение детонационного фронта в области, не затронутой волнами срыва реакции, является практически однородным. Мелкая рябь свечения на кадрах, представленных на рис. 5, обусловлена ПЗС-сенсорами и наблюдается и при меньших значениях концентрации ацетона, при которых детонационный фронт устойчив. Это демонстрирует рис. 6, на котором представлено несколько кадров свечения фрон-

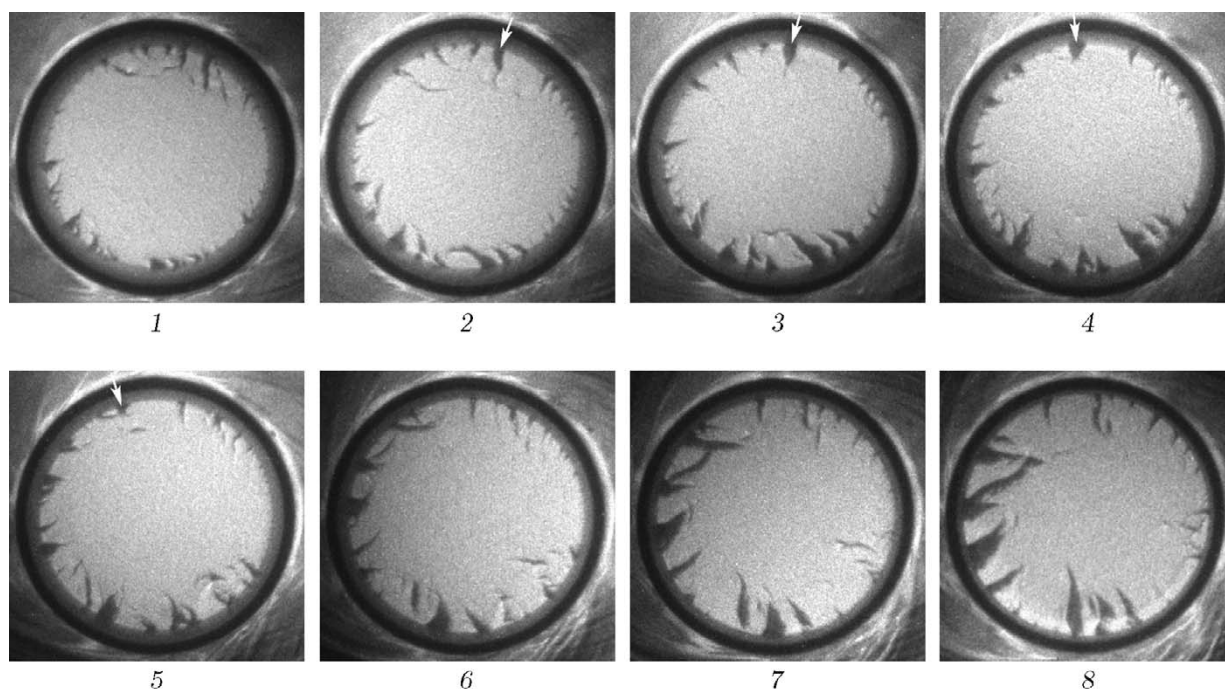


Рис. 5. Снимки свечения детонационного фронта в смеси ТНМ/Ац 50/50 при возникновении волн срыва реакции

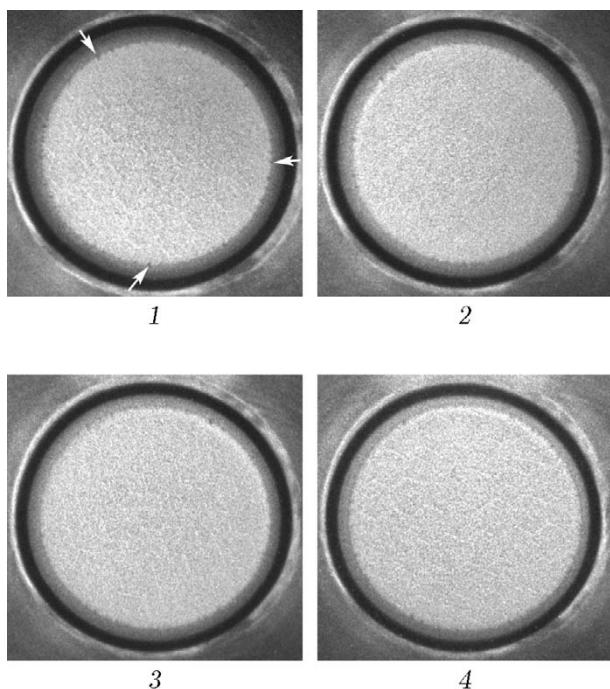


Рис. 6. Снимки свечения детонационного фронта в смеси ТНМ/Ац 55/45

та в смеси ТНМ/Ац 55/45, полученных с интервалом 1 мкс. Ячеистая неустойчивость при данной концентрации ацетона отсутствует (см.

рис. 2,б), тем не менее, как и на рис. 5, свечение неоднородно. Следует отметить также, что на рис. 6 фиксируется зарождение волн срыва реакции, некоторые из них отмечены стрелками на первом кадре. Темные области, соответствующие прекращению реакции, имеют характерный размер менее 1 мм и наблюдаются по всей внутренней окружности заряда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показывают, что в смесях ТНМ с ацетоном происходят принципиальные изменения структуры детонационных волн при добавлении горючего. Прежде всего, следует отметить резкое уменьшение амплитуды химика, вплоть до его исчезновения, в определенном интервале концентраций. Аналогичное явление ранее наблюдалось авторами [1–3] при использовании в качестве разбавителей ТНМ метанола и нитробензола. Возможность реализации подобных режимов теоретически обоснована в работах [17–20], авторы которых рассмотрели реальную структуру фронта ударной волны и допустили возможность реакции ВВ непосредственно при сжатии. Добавление в ТНМ ацетона значительно увеличивает начальную скорость реакции смеси, в резуль-

тате чего ВВ начинает реагировать непосредственно во фронте ударной волны, что и приводит к исчезновению химпика. Подтверждением этого является рост скорости после ударного скачка и формирование характерного максимума при $t \approx 10$ нс, что наблюдается на всех профилях скорости в интервале концентраций ацетона $10 \div 35$ % (см. рис. 2, а, б).

Вероятно, следствием высокой начальной скорости реакции является также устойчивость детонационных волн в смесях ТНМ с ацетоном по отношению к возмущениям, приводящим к формированию ячеистой структуры фронта. Неустойчивость появляется лишь при приближении к критической концентрации горючего (см. рис. 2, в и 5). То же самое наблюдается и по отношению к возникновению волн срыва реакции. При этом волны срыва реакции появляются раньше (при 45 % ацетона) ячеистой неустойчивости, тогда как обычно считается, что оба вида неустойчивости должны проявляться одновременно. Полученный результат подтверждает приведенные в работе [21] экспериментальные данные для конкретных жидких ВВ, которые показывают как возможность существования волн срыва реакции при устойчивом фронте детонации (когда ячеистая структура отсутствует), так и отсутствие волн срыва реакции при неустойчивом детонационном фронте.

Тем не менее в смеси ТНМ/Ац, так же как и при добавках метанола и нитробензола [2, 3], наблюдается другой вид неустойчивости, заключающийся в плохой воспроизводимости волновых профилей от опыта к опыту в окрестности стехиометрической концентрации. При этом, однако, расхождение профилей скорости значительно меньше, чем в смесях ТНМ/М и ТНМ/НБ, и лишь в несколько раз превышает экспериментальную погрешность. Как уже отмечалось, по мнению авторов [6], это обусловлено многостадийностью химических реакций, в результате чего энерговыделение случайным образом зависит от многих факторов. Тем не менее вопрос о динамике распространения детонационных волн в области плохой воспроизводимости остается открытым и требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Уткин А. В., Мочалова В. М., Рыкова В. Е. Воспроизводимость детонационных параметров смесей тетранитрометана с метанолом и нитробензолом // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 54, № 3. — С. 97–103. — DOI: 10.15372/FGV20210309.
4. Зотов Е. В. Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2004.
5. Fedorov A. V., Mikhaylov A. L., Men'shikh A. V., Nazarov D. V., Finyushin S. A., Davydov V. A. On the stability of the detonation wave front in the high explosive liquid mixture tetranitromethane/nitrobenzene // J. Energ. Mater. — 2010. — V. 28, N (S1). — P. 205–215. — DOI: 10.1080/07370651003639371.
6. Апин А. Я., Воскобойников И. М., Соснова Г. С. Протекание реакции в детонационной волне смесевых взрывчатых веществ // ПМТФ. — 1963. — № 5. — С. 115–117.
7. 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.
8. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
9. Mochalova V., Utkin A. Determination of detonation parameters for liquid high explosives // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426, N 1. — P. 303–306. — DOI: 10.1063/1.3686279.
10. Bourasseau E., Dubois V., Desbiens N., Maillet J. B. Molecular simulations of Hugoniot of detonation product mixtures at chemical equilibrium: Microscopic calculation of the Chapman — Jouguet state // J. Chem. Phys. — 2007. — V. 127, N 8. — 084513. — DOI: 10.1063/1.2766939.
11. Mader C. L. Numerical modeling of Explosives and Propellants. — 3d ed. — Boca Raton: CRC Press, 2008.
12. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепекин В. И. Термодинамический расчет идеальной и неидеальной детонации // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 4. — С. 75–84.
13. Fried L. E., Souers P. C. BKWC: An empirical BKW parametrization based on cylinder test data // Propell., Explos., Pyrotech. —

1. Мочалова В. М., Уткин А. В., Гаранин В. А., Торунов С. И. Исследование структуры детонационных волн в тетранитрометане

1996. — V. 21, N 4. — P. 215–223. — DOI: 10.1002/rep.19960210411.
14. **Kozyrev N. V.** Reparametrization of the BKW equation of state for CHNO explosives which release no condensed carbon upon detonation // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2015. — V. 12, N 4. — P. 651–669.
15. **Одинцов В. В., Губин С. А., Пепекин В. И., Акимова Л. Н.** Определение формы и размера кристаллов алмаза за детонационной волной в конденсированных взрывчатых веществах // *Хим. физика.* — 1991. — Т. 10, № 5. — С. 687–695.
16. **Харитон Ю. Б.** О детонационной способности взрывчатых веществ // *Вопросы теории взрывчатых веществ.* — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. — Кн. 1. — С. 7–28.
17. **Hirschfelder J. O., Curtiss C. F.** Theory of detonations. I. Irreversible unimolecular reaction // *J. Chem. Phys.* — 1958. — V. 28, N 6. — P. 1130–1147. — DOI: 10.1063/1.1744357.
18. **Вильямс Ф. М.** Теория горения. — М.: Наука, 1971.
19. **Фикетт У.** Введение в теорию детонации. — М.: Мир, 1989.
20. **Дремин А. Н.** Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке // *Физика горения и взрыва.* — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 31–44.
21. **Уткин А. В., Мочалова В. М., Торуннов 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.

Поступила в редакцию 12.07.2022.

После доработки 24.08.2022.

Принята к публикации 07.09.2022.
