

УДК 534.222.2

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В РАСТВОРАХ ФИФО/МЕТАНОЛ

А. В. Уткин<sup>1,2</sup>, В. М. Мочалова<sup>1,2</sup>, С. И. Торунов<sup>1</sup>, С. А. Колдунов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка<sup>2</sup>Томский государственный университет, 634050 Томск, utkin@icp.ac.ru

С использованием интерферометра VISAR и скоростного фоторегистратора проведено исследование структуры детонационных волн в смесях бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль (ФИФО) с метанолом, массовая концентрация которого изменялась в диапазоне 0 ÷ 35 %. Показано, что существующие в жидких взрывчатых веществах два вида неустойчивости: одномерная неустойчивость детонационного фронта и неустойчивость волны срыва реакции на краю заряда — могут реализоваться в любом сочетании. Определено время реакции исследованных смесей, показан различный характер зависимости критического диаметра детонации и времени реакции от концентрации разбавителя.

Ключевые слова: детонация, неустойчивость, волна срыва реакции, время реакции, ФИФО, метанол, критический диаметр.

DOI 10.15372/FGV20170111

### ВВЕДЕНИЕ

В жидких взрывчатых веществах (ВВ) детонационные волны распространяются как в стационарном, так и в неустойчивом, пульсирующем режиме [1–3]. При этом следует различать потерю устойчивости одномерного течения, реализующегося при отсутствии влияния границ (пульсирующий детонационный фронт) [4, 5], и неустойчивость на краю заряда (волны срыва реакции) [6]. Оба вида неустойчивости обусловлены одними и теми же причинами: взаимным влиянием друг на друга динамики течения и скорости химической реакции. Поэтому может показаться естественным, что детонационный фронт должен быть устойчивым либо пульсации фронта и волны срыва реакции должны проявляться одновременно. Не менее очевидно, однако, и то, что течение в центре и на краю заряда существенно отличается и условия потери устойчивости не обязаны выполняться вдоль всего фронта. Целью данной работы является доказательство того, что в действительности взаимосвязь этих двух видов неустойчивости не является строго

детерминированной. Меняя кинетику химических реакций, например, посредством разбавления жидкого ВВ инертными растворителями или сенсibilизаторами, можно получить детонационные волны, в которых оба вида неустойчивости проявляются в любом сочетании.

Следует отметить, что существование волны срыва реакции принципиально меняет физическую природу критического диаметра детонации. Как показано в [6], критический диаметр в этом случае определяется периодом индукции теплового взрыва на краю заряда, а не временем реакции в детонационной волне, как это имеет место в устойчивых детонационных волнах [7]. Этот факт необходимо учитывать при определении времени реакции жидких ВВ на основании характера зависимости критического диаметра от концентрации разбавителя. При некоторой концентрации в смеси могут возникнуть волны срыва реакции, что приведет к резкому увеличению критического диаметра, тогда как время реакции изменится незначительно. Это явление также изучалось в данной работе.

В качестве объектов исследования выбраны бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль (ФИФО,  $C_5H_6N_4O_{10}F_2$ ) и его смеси с метанолом. Регистрация структуры детонационной волны осуществлялась интерферометром VISAR и скоростным фоторегистратором СФР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-07830-а).

© Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И., Колдунов С. А., 2017.

## СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Начальная плотность жидкого ВВ ФИФО составляла  $1.60 \text{ г/см}^3$  [8–11]. Смеси ФИФО/метанол готовили непосредственно перед экспериментом. Распределение массовой скорости в зоне химической реакции регистрировали с помощью интерферометрической методики VISAR. Характер изменения профилей скорости позволяет судить об одномерной устойчивости детонационного фронта. Схема экспериментов показана на рис. 1, а. Заряд ВВ помещался в оболочку, внутренний диаметр которой изменялся от 26 до 50 мм. Оболочки изготавливались из различных материалов, сжимаемость которых была как больше (полипропилен, полиметилметакрилат (ПММА)), так и меньше (сталь, латунь) сжимаемости жидкого ВВ. Варьирование диаметра и материала оболочки позволило исключить влияние границы на течение в центральной части заряда. Длина заряда составляла 150 мм. Детонацию инициировали прессованным зарядом флегматизированного гексогена, который отделялся от жидкого ВВ алюминиевым экраном толщиной 2 мм. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной 7 мкм, расположенной между торцом заряда и прозрачным окном, в качестве которого использовалась вода. Регистрировалась скорость движения по-

верхности фольги, граничащей с водой. Эти экспериментальные данные передают все детали профиля массовой скорости в детонационной волне. Постоянная интерферометра равна 305 м/с, что позволяет определять скорость с точностью  $\pm 10 \text{ м/с}$ . Одновременно в каждом опыте с использованием ионизационного датчика измерялась скорость детонации  $D$ . Второй меткой времени являлся сигнал интерферометра, регистрирующий выход детонационной волны на границу с окном. Погрешность определения скорости детонации не превышала 1 %.

Устойчивость неоднородного течения, возникающего в детонационной волне на краю заряда, исследовалась с помощью скоростной камеры СФР, работающей в режиме щелевой развертки (рис. 1, б). ВВ помещалось в плексиглазовую трубку с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина оболочки составляла 150 мм. Инициирование детонации осуществлялось плосковолновым генератором из ТГ 50/50 диаметром 40 мм. В экспериментах регистрировалось свечение детонационного фронта по мере его распространения по заряду. Причем вид границы ВВ зависит от отсутствия или наличия волн срыва реакции: в первом случае граница детонационного фронта гладкая, во втором — зигзагообразная [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Неустойчивость одномерной детонационной волны

Измеренные интерферометром VISAR профили скорости для ФИФО и его смесей с метанолом приведены на рис. 2. Состав исследованных смесей (массовая концентрация), материал и внутренний диаметр оболочки, а также измеренные скорости детонации  $D$  и время реакции  $\tau$  представлены в таблице. Толщина стенки оболочек составляла 2 мм, за исключением стальной оболочки диаметром 50 мм, где она равнялась 3 мм. Параметры в точке Чепмена — Жуге удовлетворительно определяются в предположении, что показатель политропы равен 2.8. Звездочкой в таблице отмечены эксперименты, в которых для отражения зондирующего излучения использовалась алюминиевая фольга толщиной 400 мкм. Обозначения профилей скорости на рисунках совпадают с номерами опытов в таблице.

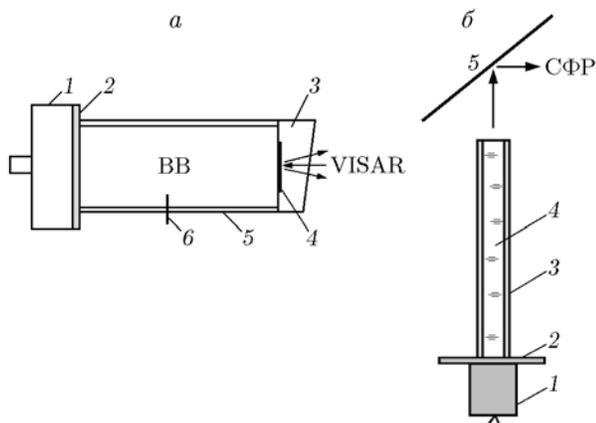


Рис. 1. Схемы экспериментов по регистрации течения в зоне реакции (а) и регистрации свечения детонационного фронта (б):

а: 1 — инициирующий заряд ВВ, 2 — алюминиевый экран, 3 — водяное окно, 4 — алюминиевая фольга, 5 — оболочка, 6 — ионизационный датчик; б: 1 — инициирующий заряд ВВ, 2 — экран из Al, 3 — оболочка из ПММА, 4 — исследуемое ВВ, 5 — зеркало

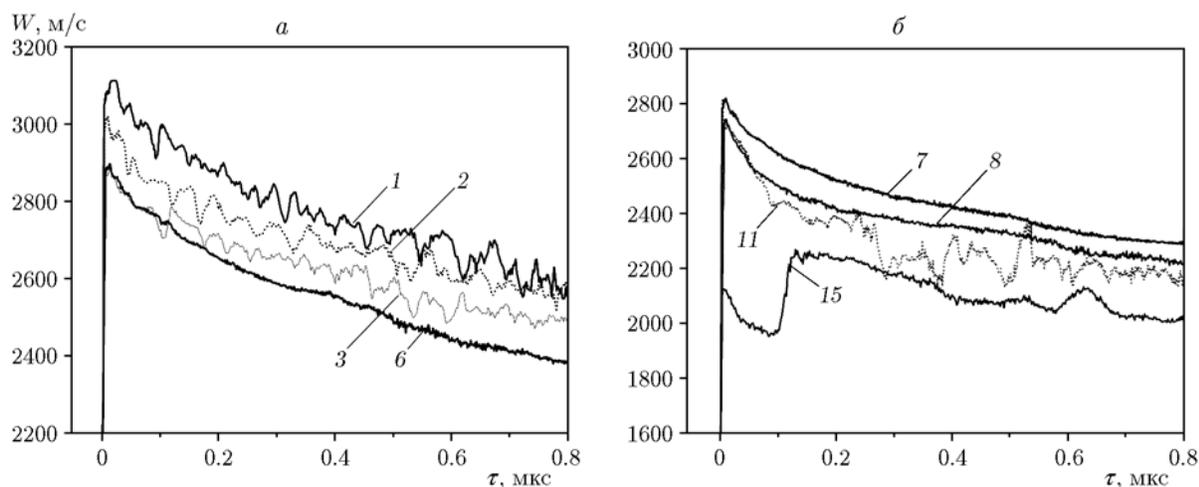


Рис. 2. Профили массовой скорости при различной концентрации метанола

№ п/п	ФИФО/метанол	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Оболочка		$D$ , км/с	$\tau$ , нс
			материал	диаметр, мм		
1	100/0	1.60	Алюминий	36	$7.52 \pm 0.03$	$300 \pm 50$
2	98/2	1.57	ПММА	36	$7.37 \pm 0.03$	—
3	95/5	1.52	ПММА	36	$7.15 \pm 0.03$	—
4	92/8	1.48	ПММА	36	$6.98 \pm 0.03$	—
5	90/10	1.45	Латунь	26	$6.90 \pm 0.03$	$450 \pm 25$
6			Полипропилен	46		
7	88/12	1.42	Латунь	26	—	—
8	85/15	1.39	Латунь	26	$6.64 \pm 0.03$	$650 \pm 25$
9			Сталь	50		
10			Полипропилен	46		
11	80/20	1.33	Сталь	50	$6.41 \pm 0.03$	$1100 \pm 100$
12*			Сталь	50		
13*			Латунь	36		
14	75/25	1.28	Сталь	50	$6.12 \pm 0.03$	—
15*			Сталь	50		
16	70/30	1.22	Сталь	50	$5.78 \pm 0.03$	—
17	68/32	1.20	Сталь	50	$5.67 \pm 0.03$	—
18	65/35	1.18	Сталь	50	$5.11 \pm 0.03$	—

Ранее ударно-волновые и детонационные свойства ФИФО исследовались в работах [9–15]. В частности, авторами [10, 11] было показано, что в чистом ФИФО детонация является неустойчивой. На зависимости скорости от времени при нулевой концентрации мета-

нола (рис. 2, *a*, зависимость 1) неустойчивость проявляется в сильных осцилляциях скорости как в зоне химической реакции, так и в волне разгрузки, с характерной амплитудой около 50 м/с. Отчетливо выраженный период колебаний отсутствует, но порядок величины состав-

ляет примерно 50 нс. Это означает, что детонационный фронт неустойчив и размер неоднородностей сопоставим с толщиной фольги, т. е. порядка 10 мкм. Причем характер неустойчивости никак не связан с влиянием границы заряда, что подтверждается неизменностью качественного вида профилей скорости при изменении диаметра и материала оболочки.

Разбавление ФИФО метанолом снижает детонационные параметры смеси, поэтому следовало бы ожидать еще большего развития неустойчивости детонационного фронта. Однако влияние метанола на устойчивость значительно сложнее. При концентрациях метанола менее 10 % течение остается практически неизменным: характер осцилляций, их частота и амплитуда такие же, как и в чистом ФИФО (рис. 2, а, зависимости 2, 3). При дальнейшем увеличении концентрации метанола в интервале 10 ÷ 15 % вместо развития неустойчивости неожиданно наблюдается стабилизация детонационного фронта, что проявляется в исчезновении осцилляций на профилях скорости (зависимости 6–8 на рис. 2). И только когда концентрация метанола достигает 20 % (зависимость 11 на рис. 2, б) и более, течение вновь становится неустойчивым. При этом пульсации настолько велики, что регистрировать скорость удается лишь при большой толщине отражающей фольги, которая сглаживает осцилляции на фронте. На рис. 2, б приведен профиль скорости 15 для смеси 75/25 при толщине фольги 400 мкм. В случае использования толстой фольги в начальный момент времени наблюдается характерный «провал» скорости. Он обусловлен тем, что после выхода ударной волны на границу фольга — вода спад скорости, связанный с наличием химпика в ВВ, через 100 нс сменяется резким ее увеличением, которое вызвано приходом волны сжатия, переотраженной от границы ВВ — фольга. Все детали течения, связанные с циркуляцией волн в фольге, могут быть детально проанализированы в плоскости давления — массовая скорость [16]. Важно отметить, что осредненный таким образом профиль скорости, как и другие осредненные параметры течения, достаточно хорошо воспроизводится. В частности, скорость детонации при фиксированном составе смеси остается постоянной от опыта к опыту.

При массовой концентрации метанола  $C > 32\%$  смесь не детонирует и измерения показывают резкое падение скорости затухающей

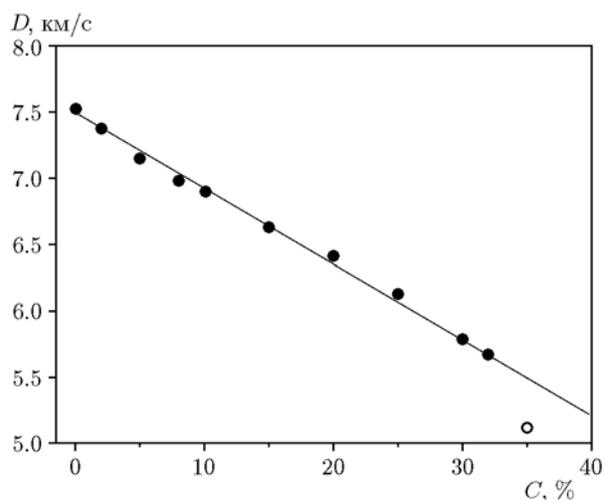


Рис. 3. Зависимость скорости детонации смеси ФИФО/метанол от концентрации метанола

детонации по отношению к линейной аппроксимации экспериментальных данных:  $D = 7.49 - 0.057C$  [км/с] (рис. 3). Это отчетливо видно при  $C = 35\%$  (светлая точка на рис. 3). Поэтому концентрация 32 % является предельной для смеси ФИФО/метанол.

Следует отметить, что ранее аналогичное явление стабилизации детонационных волн наблюдалось в смеси ФИФО/нитробензол при массовой концентрации разбавителя 10 ÷ 20 % [10]. При этом предельная концентрация нитробензола равнялась 45 %. Таким образом, вариация разбавителей приводит лишь к количественным изменениям, оставляя качественную картину явления неизменной.

### Волны срыва реакции

До сих пор рассматривалась устойчивость одномерной детонации в смеси ФИФО/метанол. Для регистрации неоднородного течения на краю заряда использовалась скоростная фотокамера (см. рис. 1, б), примеры торцевой развертки свечения фронта детонационной волны приведены на рис. 4. Время возрастает слева направо, стрелками указаны моменты иницирования детонации и ее выхода на свободную поверхность. Поскольку детонационный фронт в чистом ФИФО неустойчив, следовало ожидать формирования волн срыва реакции на краю заряда. Однако, вопреки общепринятым представлениям, боковая граница распространения детонационной волны глад-

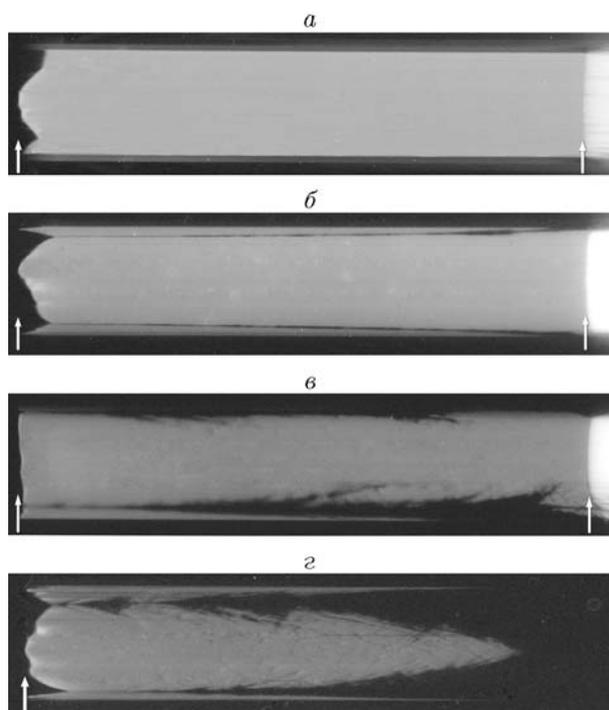


Рис. 4. Торцевая развертка свечения фронта детонационной волны в ФИФО (*a*) и смесях ФИФО/метанол составов 90/10 (*б*) и 85/15 (*в, г*):

стрелками указаны момент инициирования детонации и время выхода волны на свободный торец заряда

кая (рис. 4, *a*). ФИФО, таким образом, является примером жидкого ВВ, в котором при отчетливо выраженной неустойчивости одномерного детонационного фронта волны срыва реакции на краю заряда отсутствуют. Возможные причины столь непривычного характера течения рассматриваются при обсуждении результатов.

Разбавление ФИФО метанолом не приводит к возникновению волн срыва реакции, если концентрация растворителя меньше 10 %. Первые признаки неустойчивости появляются в смеси ФИФО/метанол 90/10 (рис. 4, *б*). При концентрации метанола 12 % волны срыва реакции видны уже отчетливо. Когда же количество разбавителя достигает 15 %, волны срыва реакции распространяются до оси заряда (рис. 4, *в*), что приводит к затуханию детонации. Расстояние, на котором это происходит, зависит, в частности, от давления инициирования детонации. В опыте, результат которого приведен на рис. 4, *в*, для этой цели использо-

вался заряд гексогена и детонация не затухала на расстоянии 150 мм. При инициировании смеси тротильным зарядом детонация затухает на расстоянии около 100 мм. Щелевая развертка свечения детонационного фронта в данной ситуации приведена на рис. 4, *г* и является типичной для ВВ, критический диаметр детонации которых определяется волнами срыва реакции [6]. То есть диаметр используемого в опытах заряда ( $\varnothing 36$  мм) равен критическому для смеси состава 85/15.

### Время реакции

Сложность определения положения точки Чепмена — Жуге в жидких ВВ обусловлена отсутствием каких-либо особенностей на профиле скорости при переходе от зоны реакции к волне разрежения. Тем не менее проблема определения ширины зоны химической реакции принципиально решается однозначно. Для этого необходимо организовать эксперимент таким образом, чтобы в различных опытах течения в зоне реакции совпадали, а в волне разгрузки — нет. Например, можно менять диаметр зарядов, динамическую жесткость материала оболочки, условия инициирования детонации. Если диаметр значительно превышает критический, то течение в зоне реакции остается неизменным, тогда как градиент скорости в волне разгрузки зависит от диаметра. Ранее этот метод был применен для определения времени реакции в ФИФО, тетранитрометане, нитрометане [17] и смеси нитрометана с ДЭТА [18]. В частности, для ФИФО получено значение  $300 \pm 50$  нс. Большая погрешность измерения обусловлена осциллирующим характером профилей массовой скорости в чистом ФИФО (см. рис. 2, *a*). По этой же причине указанное значение является, вероятно, оценкой сверху, поскольку расхождение профилей скорости заметно, лишь когда оно превышает амплитуду осцилляций. Можно ожидать, что в смесях с метанолом в случае реализации устойчивого детонационного фронта положение точки Чепмена — Жуге будет определяться с большей точностью.

Результаты измерения профилей скорости в двух опытах при концентрации метанола в смеси 10 % приведены на рис. 5, *a*. Оболочки были изготовлены из различных материалов (полипропилен и латунь), а их диаметры различались более чем в полтора раза. В опыте 5 боковая разгрузка более интенсивна и, как видно

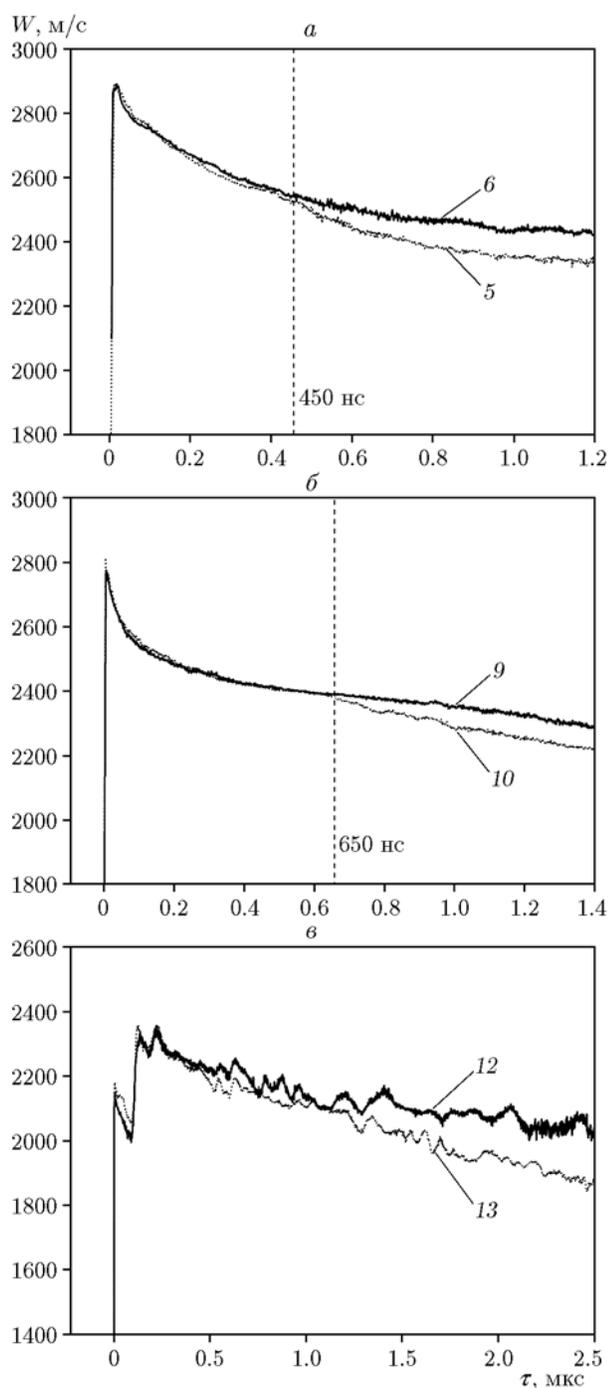


Рис. 5. Профили массовой скорости при различных оболочках зарядов смеси ФИФО/метанол составов 90/10 (а), 85/15 (б), 80/20 (в)

на рисунке, это привело к заметному расхождению профилей скорости при  $\tau > 450$  нс. При меньшем времени скорости практически совпадают. Поэтому можно утверждать, что время

реакции равно  $\tau = 450 \pm 25$  нс. Аналогичные опыты были проведены со смесью ФИФО/метанол 85/15. Результаты измерения показали (рис. 5, б), что расхождение профилей скорости при использовании различных оболочек начинается при  $\tau = 650 \pm 25$  нс.

Сильные осцилляции скорости делают практически невозможным использование данного метода для определения ширины зоны реакции при больших концентрациях метанола. Даже осреднение профилей скорости посредством использования толстой алюминиевой фольги для отражения зондирующего излучения не всегда дает желаемый результат. Возникающие при этом сложности наглядно демонстрируют опыты, выполненные со смесью 80/20. Профили скорости, полученные при толщине отражающей фольги 400 мкм, приведены на рис. 5, в. В данном случае характерное время реакции определяется с удовлетворительной точностью и равно  $1.1 \pm 0.1$  мкс. При этом для корректной оценки  $\tau$  требуется выполнение ряда, иногда взаимоисключающих, условий. Из-за значительных колебаний осредненных профилей необходимо, чтобы скорости в волне разгрузки различались как можно больше, т. е. существенно различными должны быть диаметры зарядов. Но при уменьшении диаметра латунной оболочки до 26 мм заметно снижаются параметры Чепмена — Жуге из-за приближения к критическому диаметру, и профили начинают расходиться непосредственно за ударным скачком. Поэтому использовалась латунная оболочка диаметром 36 мм (профиль 13 на рис. 5, в). Максимальный диаметр зарядов в проведенных опытах составлял 50 мм. Другая сложность обусловлена заметным ростом времени реакции с увеличением концентрации метанола. В связи с этим необходимо обеспечить большее время регистрации процесса, что крайне сложно сделать для неустойчивых детонационных волн.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают, что разбавление ФИФО метанолом позволяет реализовать различные сочетания неустойчивостей одномерного течения (пульсации детонационного фронта) и течения на краю заряда (волны срыва реакции). При концентрации метанола  $C < 10\%$  фронт неустойчив, но волны срыва реакции отсутствуют. В интервале  $C =$

10 ÷ 15 % фронт стабилизируется, но появляются волны срыва реакции. Дальнейшее увеличение содержания метанола приводит к полной потере устойчивости детонации, при которой наблюдаются как пульсации детонационного фронта, так и волны срыва реакции. Если к этим результатам добавить хорошо известный факт существования абсолютно устойчивой детонации в жидких ВВ [6], то приходим к выводу об отсутствии жестко детерминированной связи между условиями сосуществования двух рассмотренных видов неустойчивости.

Наиболее неожиданным является течение без волн срыва реакции при наличии пульсаций детонационного фронта, которое наблюдается в ФИФО. Это явление находит объяснение, если допустить возможность реакции ВВ непосредственно во фронте волны сжатия. В чистом ФИФО из-за высокой начальной скорости реакции доля разложения может быть достаточно высокой. Это приводит к снижению скорости реакции за ударным скачком, что проявляется в относительно медленном спаде скорости в химпике. В результате формальные критерии устойчивости одномерной детонации, полученные без учета реакции во фронте [4, 5], нарушаются. При добавлении инертного разбавителя метанола начальная скорость реакции, а следовательно, и количество прореагировавшего во фронте ВВ уменьшаются и быстрая стадия реакции перемещается в химпик, стабилизируя течение.

Снижение давления и температуры при приближении к краю заряда приводит в данном случае к тому же эффекту, что и разбавление ФИФО инертной добавкой: доля разложившегося ВВ во фронте ударной волны уменьшается, но скорость химической реакции за скачком может даже возрасти. В результате условия формирования волн срыва реакции не достигаются.

Появление волн срыва реакции при концентрации метанола более 10 % приводит к изменению природы критического диаметра детонации, который начинает определяться периодом индукции теплового взрыва на краю заряда [6], а не временем реакции в детонационной волне, как это имеет место в устойчивых детонационных волнах [7]. Результатом этого является различный характер зависимостей критического диаметра и времени реакции от концентрации разбавителя, что убедительно демонстрирует рис. 6. Данные для критическо-

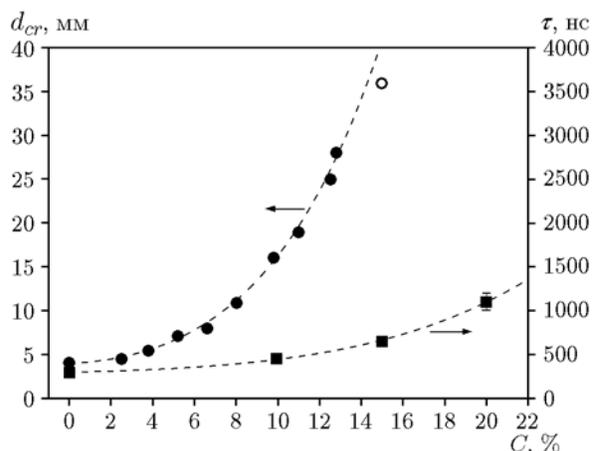


Рис. 6. Зависимость критического диаметра и времени реакции от массовой концентрации разбавителя:

● — работа [12], ○, ■ — данная работа

го диаметра взяты из работы [12] для смеси ФИФО/этанол. Близким, вероятно, будет и поведение аналогичной зависимости для смеси с метанолом. Точка, полученная в данной работе при концентрации метанола 15 %, подтверждает это. Видно, что зависимость критического диаметра от концентрации разбавителя является сильно нелинейной и особенно резкий рост начинается после 7 %. Причем критический диаметр детонации при содержании метанола в смеси 15 % возрастает на порядок, тогда как время реакции увеличивается только в два раза.

Точно определить концентрацию разбавителя, при которой произойдет смена природы критического диаметра детонации, достаточно сложно, поскольку при уменьшении диаметра меняется течение на краю заряда из-за увеличения кривизны поверхности. Поэтому нельзя исключать вероятность того, что при приближении к критическому диаметру появятся волны срыва реакции, отсутствовавшие при больших диаметрах.

Следует отметить, что авторы [12] использовали тонкостенные бумажные оболочки, покрытые внутри полиэтиленом, т. е. жесткость оболочек была меньше, чем у ФИФО. Именно в такой постановке и следует определять критический диаметр жидких ВВ. При использовании жестких оболочек волны срыва реакции не возникают, и в этом случае характер изменения критического диаметра будет соответствовать характеру изменения времени реакции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкин 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. Зайдель Р. М. Об устойчивости детонационных волн в газовых смесях // Докл. АН СССР. — 1961. — Т. 136, № 5. — С. 1142–1145.
5. Асланов С. К., Будзировский 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. Харитон Ю. Б. О детонационной способности взрывчатых веществ. Вопросы теории взрывчатых веществ. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. — Кн. 1.
8. Энергетические конденсированные системы: краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
9. Finger M., Lee E., Helm F. H., Hayes B., Hornig H., McGuire R., Kahara M., Guidry M. The effect of elemental composition on the detonation behavior of explosives // Proc. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation, August 24–27, 1976, Coronado, California, USA. — P. 710–722.
10. Торунов С. И., Уткин А. В., Мочалова В. М., Гаранин В. А. Параметры стационарных детонационных волн в растворе ФИФО/нитробензол // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 119–123.
11. 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.
12. Воскобойников И. М., Душенюк С. А., Котомин А. А. Критические диаметры детонации растворов бисфтординитроэтилформаль // Хим. физика. — 1998. — Т. 17, № 11. — С. 130–139.
13. Воскобойников И. М., Душенюк С. А., Котомин А. А. Пределы ударно-волнового инициирования взрыва жидких бисфтординитроэтилформаль и 1,6-диазидо-2-ацетоксигексана // Хим. физика. — 1998. — Т. 17, № 12. — С. 58–61.
14. Gibson L. L., Sheffield S. A., Dattelbaum D. M., Stahl D. B. Shock initiation and detonation properties of bisfluorodinitroethyl formal (FEFO) // Shock Compression of Condensed Matter — 2011 / M. L. Elert, W. T. Buttler, J. P. Borg, J. L. Jordan, T. J. Vogler (Eds). — Amer. Inst. of Physics, 2012. — 978-0-7354-1006-0. — P. 323–326.
15. Gogulya M. F., Dolgoborodov F. Yu., Brazhnikov M. A., Dushenok S. A. Shock wave initiation of liquid explosives // Shock Compression of Condensed Matter — 1999 / M. D. Furnish, L. C. Chhabildas, R. S. Hixson (Eds). — Amer. Inst. of Physics, 2000. — 1-56396923-8/00. — P. 903–906.
16. Мочалова В. М., Уткин А. В., Ананьин А. В. Влияние дисперсности на структуру детонационной волны в прессованном ТНЕТВ // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 90–95.
17. Уткин А. В., Мочалова В. М., Торунов С. И. Определение детонационных параметров жидких взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 72–77.
18. Мочалова В. М., Уткин А. В., Лапин С. М. Влияние малых добавок диэтилентриамин на ширину зоны реакции в детонационных волнах в нитрометане // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 82–88.

*Поступила в редакцию 5/IV 2016 г.,  
в окончательном варианте — 23/V 2016 г.*