

ПАРАМЕТРЫ СТАЦИОНАРНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В РАСТВОРЕ ФИФО/НИТРОБЕНЗОЛ

С. И. Торуннов, А. В. Уткин, В. М. Мочалова, В. А. Гаранин

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

Приведены результаты экспериментального исследования структуры зоны реакции при стационарной детонации в бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формале (ФИФО, $C_5H_6N_4O_{10}F_2$) и его смесях с нитробензолом (НБ). Для чистого ФИФО измерены давление и массовая скорость в точке Чепмена — Жуге, а также характерное время реакции. Для ФИФО/НБ определена зависимость параметров детонации смеси от концентрации НБ и показано, что в чистом ФИФО и в смесях, содержащих более 30 % НБ, детонационный фронт неустойчив.

Ключевые слова: жидкие взрывчатые вещества, бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль.

ВВЕДЕНИЕ

Структура детонационных волн в жидких взрывчатых веществах (ВВ) определяется скоростью химической реакции при ударно-волновом воздействии и может существенно меняться при добавлении в них инертных разбавителей. Поскольку распределение параметров в зоне реакции, устойчивость и пределы распространения детонационной волны зависят от начальной скорости реакции [1], то экспериментальное определение этой величины дает важную информацию для прогнозирования детонации жидких ВВ. В данной работе с использованием лазерного интерферометра VISAR, обладающего наносекундным временным разрешением, проведено экспериментальное исследование детонационных параметров и структуры зоны реакции в бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формале (ФИФО) и его смесях с нитробензолом (НБ).

Схема экспериментов показана на рис. 1. В опытах использовался ФИФО с началь-

ной плотностью 1.600 г/см^3 [2, 3]. Смеси ФИФО/НБ готовили непосредственно перед экспериментом. Заряд ВВ помещался в полиэтиленовую (внутренний диаметр 36 мм, толщина стенки 2 мм) либо стальную (внутренний диаметр 50 мм, толщина стенки 3 мм) оболочку. Длина заряда составляла 150 мм. Детонацию инициировали прессованным зарядом флегматизированного гексогена. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной $7 \div 400 \text{ мкм}$, расположенной между торцом заряда и водяным окном. В экспериментах определяли скорость движения поверхности фольги, граничащей с водой, которая передает все детали профиля массовой скорости в детонационной волне. Постоянная интерферометра равна 305 м/с, что позволяло определять скорость с точностью $\pm 10 \text{ м/с}$. С помощью ионизационного датчика в каждом опыте измеряли скорость детонации. Второй меткой времени являлся сигнал интерферометра, регистрирующий выход детонационной волны на границу с окном. Точность определения скорости детонации была не хуже 1 %.

ФИФО

Измеренные профили скорости для ФИФО показаны на рис. 2. Предполагалось, что в чистом ФИФО детонационный фронт устойчив, поэтому опыты были проведены с использованием тонкой алюминиевой фольги толщиной 7 мкм. Результат, однако, оказался иным, что отчетливо демонстрирует зависимость 1. Профиль массовой скорости как в зоне химической реакции, так и в волне разгрузки

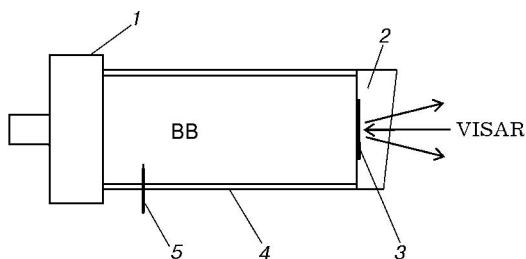


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — инициирующий заряд, 2 — водяное окно, 3 — алюминиевая фольга, 4 — оболочка заряда, 5 — ионизационный датчик

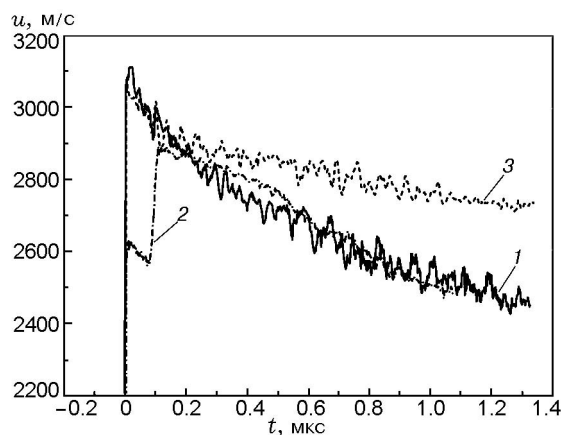


Рис. 2. Профили скорости на границе ФИФО — водяное окно:

1, 3 — алюминиевая фольга толщиной 7 мкм, 2 — 400 мкм; 1, 2 — заряд в полиэтиленовой оболочке, 3 — в стальной

является сильно осциллирующим, характерная амплитуда осцилляций ≈ 50 м/с. Отчетливо выраженный период колебаний отсутствует, но порядок величины составляет примерно 50 нс. Это означает, что детонационный фронт неустойчив и размер неоднородностей сопоставим с толщиной фольги, т. е. порядка 10 мкм. Использование более толстой фольги должно привести к сглаживанию осцилляций на фронте, что и подтверждают результаты экспериментов. Зависимость 2 на рис. 2 получена в эксперименте с фольгой толщиной 400 мкм при той же постановке опыта, в которой получена зависимость 1. Качественно различное поведение этих зависимостей во времени вызвано лишь изменением толщины фольги. При использовании 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 0.1 мкс сменяется резким ее увеличением, вызванным приходом волны сжатия, переотраженной от границы ВВ — фольга. Все детали течения, связанные с циркуляцией волн в фольге, могут быть детально проанализированы в плоскости «давление — массовая скорость» (см. [4]). В данном случае важно отметить, что осцилляции скорости при использовании фольги толщиной 400 мкм исчезают и полученная зависимость становится гладкой. Этот результат хорошо согласуется с предположением о неустойчивости детонаци-

онного фронта в ФИФО и с приведенной выше оценкой характерного размера неоднородностей. Поскольку толщина алюминиевой фольги на порядок превышает размер неоднородностей, то фронт ударной волны сглаживается к моменту выхода на границу с водяным окном.

Следует отметить, что, несмотря на осциллирующий характер зависимости скорости от времени, результаты экспериментов хорошо воспроизводятся от опыта к опыту. Причем осредненный профиль соответствует классической модели детонации: после ударного скачка наблюдается спад скорости с формированием химпика в зоне реакции. Переход от зоны реакции к волне разгрузки является настолько плавным, что однозначно выделить на нем точку Чепмена — Жуге сложно. Однако метод определения положения звуковой плоскости хорошо известен. Для этого необходимо провести измерения волновых профилей при различных диаметрах зарядов. Если диаметр значительно превышает критический, течение в зоне реакции остается неизменным, тогда как спад скорости в волне разгрузки зависит от диаметра. Поэтому для определения точки Чепмена — Жуге использовались заряды различного диаметра с оболочками из разного материала, что также, очевидно, влияет на разгрузку. Так, например, если зависимость 1 на рис. 2 получена для заряда в полиэтиленовой оболочке (внутренний диаметр 36 мм), то зависимость 3 соответствует случаю стальной оболочки (внутренний диаметр 50 мм). Поскольку в обоих опытах использовалась фольга толщиной 7 мкм, то на третьем профиле регистрируются такие же осцилляции скорости, как и на первом. Это усложняет сравнение полученных зависимостей; тем не менее очевидно, что при временах, превышающих 0.3 мкс, профили начинают заметно расходиться. Казалось бы, использование фольги толщиной 400 мкм может привести к уточнению положения точки Чепмена — Жуге, поскольку профили сглаживаются. Этого, однако, не происходит, поскольку время циркуляции волн в фольге сопоставимо с временем реакции, что усложняет сопоставление профилей, полученных при различных диаметрах заряда. Анализ проведенных экспериментов позволяет лишь утверждать, что при применении фольги толщиной 400 мкм расхождение отчетливо наблюдается при временах, превышающих 0.4 мкс. Поэтому считалось, что характерное время реакции составляет пример-

ФИФО/НБ	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$u_{СЛ}$, км/с	$p_{СЛ}$, ГПа	u_{sh} , км/с	p_{sh} , ГПа	τ , мкс
100/0	1.600	7.52	1.98	23.9	2.5	30.0	≈ 0.35
90/10	1.549	7.20	1.91	21.4	2.7	30.0	≈ 0.40
80/20	1.500	6.87	1.83	18.9	2.5	26.0	≈ 0.40
70/30	1.455	6.53	1.75	16.7	2.2	21.0	≈ 0.50
60/40	1.414	6.10	1.64	14.2	1.9	17.0	≈ 0.55
55/45	1.394	5.93	1.59	13.2	1.9	16.0	≈ 0.60
52/48	1.382	5.62	1.51	11.7	—	—	—

но 350 ± 50 нс. Неопределенность положения точки Чепмена — Жуге не приводит в данном случае к большой погрешности определения давления и массовой скорости. Они равны 23.9 ± 0.5 ГПа и 1.98 ± 0.05 км/с соответственно. С меньшей точностью, обычно не превышающей $\pm 5\%$, определяются также параметры в химпике. Все измеренные величины: начальная плотность ρ_0 , скорость детонации D , массовая скорость $u_{СЛ}$ и давление $p_{СЛ}$ в точке Чепмена — Жуге, массовая скорость u_{sh} и давление p_{sh} в химпике, а также характерное время реакции τ приведены в таблице.

ФИФО/НБ

Критический диаметр детонации смеси ФИФО/НБ возрастает с увеличением концентрации НБ, поэтому с целью уменьшения влияния бокового разлета продуктов взрыва на результаты экспериментов во всех опытах использовалась стальная оболочка. Согласно проведенным расчетам добавление НБ монотонно снижает детонационные параметры смеси ФИФО/НБ. Следовало бы ожидать, что это приведет к еще большему развитию неустойчивости детонационного фронта. Вместо этого при малых концентрациях НБ ($C = 10 \div 20\%$) наблюдается его стабилизация, что проявляется в исчезновении осцилляций на профилях скорости, зарегистрированных при использовании 7-микронной фольги (рис. 3). Одновременно с этим резко, примерно в полтора раза по сравнению с чистым ФИФО, увеличивается амплитуда химпика. Возрастает также градиент скорости в зоне реакции, причем наиболее резкое падение скорости происходит за первые 10 нс. Высокая начальная скорость реакции за ударным скачком и приводит, согласно исследованиям на устойчивости, к стабилизации фронта детонационной волны. Возможно, столь

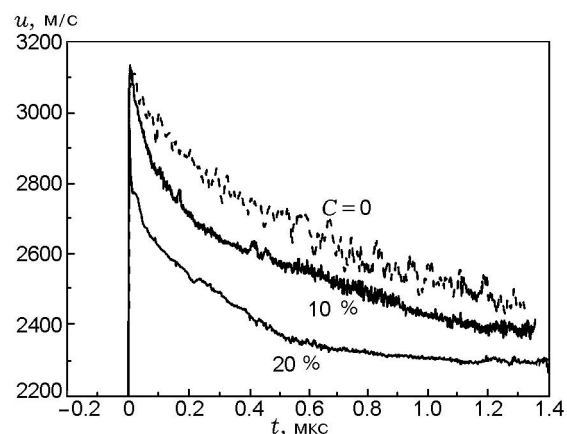


Рис. 3. Профили скорости на границе ФИФО/НБ — водяное окно:

цифрами указана концентрация НБ

необычный характер изменения структуры зоны реакции при добавлении в ФИФО инертного разбавителя обусловлен частичной реакцией ВВ непосредственно во фронте ударной волны. В чистом ФИФО из-за высокой начальной скорости реакции доля разложения достаточно велика, и максимальные давление и массовая скорость оказываются ниже значений, соответствующих пересечению прямой Михельсона с ударной адиабатой исходного ВВ [5]. В зоне реакции (см. рис. 2) происходит лишь «догорание» с относительно невысокой скоростью. При добавлении НБ начальная скорость реакции, а следовательно, и количество ВВ, прореагировавшего во фронте, уменьшаются и быстрая стадия реакции перемещается в химпик, что вызывает относительное повышение его параметров в связи с приближением к ударной адиабате ВВ. Поскольку, кроме того, разбавление ФИФО нитробензолом снижает давление в точке Чепмена — Жуге, то совокупность этих процессов приводит к увеличению амплитуды

химпика. Предположение о реакции во фронте детонации гомогенных ВВ, обоснованное в работах [5, 6], позволяет объяснить резкое увеличение амплитуды химпика и скорости реакции за фронтом при разбавлении ФИФО нитробензолом. Критерии потери устойчивости детонационного фронта в этом случае перестают быть справедливыми, поскольку получены без учета реакции во фронте [7, 8].

При увеличении концентрации НБ до 30 % вновь появляются высокочастотные осцилляции на профилях массовой скорости, амплитуда которых настолько велика, что при использовании тонкой 7-микронной алюминиевой фольги не удается однозначно расшифровать полученные экспериментальные интерферограммы. При концентрации НБ 40 % интенсивность отраженного света падает до нуля в момент выхода ударной волны на границу 7-микронной фольги с водяным окном. Вероятно, это обусловлено резким увеличением характерного размера неоднородностей на фронте детонационной волны, которые деформируют алюминиевую фольгу. Как и в случае с чистым ФИФО, увеличение толщины фольги приводит к сглаживанию осцилляций по мере распространения ударной волны по фольге. Измеренные зависимости скорости от времени в случае концентрации НБ 30 и 40 % при толщине алюминиевой фольги 200 и 400 мкм приведены на рис. 4. Причем на зависимостях, полученных при использовании 200-микронной фольги (сплошная и штриховая линии), ос-

цилляции скорости выражены отчетливо, т. е. характерный размер неоднородностей порядка 100 мкм. Увеличение толщины фольги в два раза (пунктирная линия) приводит к сглаживанию профиля. Любопытно отметить, что на осредненных профилях скорости отчетливо регистрируется химпик. Это означает, что размер неоднородностей мал по сравнению с шириной зоны химической реакции. Время реакции для смесей определить так же сложно, как и для чистого ФИФО, но оно, очевидно, превышает 0.5 мкс, что соответствует расстоянию в несколько миллиметров и по крайней мере на порядок больше характерного размера неоднородностей.

При увеличении концентрации НБ до 48 % на расстоянии 150 мм от плоскости инициирования по-прежнему наблюдается типичная структура детонационной волны с химпиком (рис. 5). Причем размер неоднородностей возрастает до такой степени, что даже применение толстой фольги не приводит к сглаживанию осцилляций скорости. Однако при увеличении длины заряда детонация затухает и регистрируется ударная волна в нереагирующей смеси ФИФО/НБ. При этом профиль скорости аналогичен представленному на рис. 5 для смеси с концентрацией НБ 50 %. Увеличение скорости на границе фольги с водяным окном осуществляется в данном случае рядом последовательных ударных скачков, как и должно быть в инертных средах. Отметим также, что профиль при этом становится гладким, в полном соответствии с требованием устойчивости

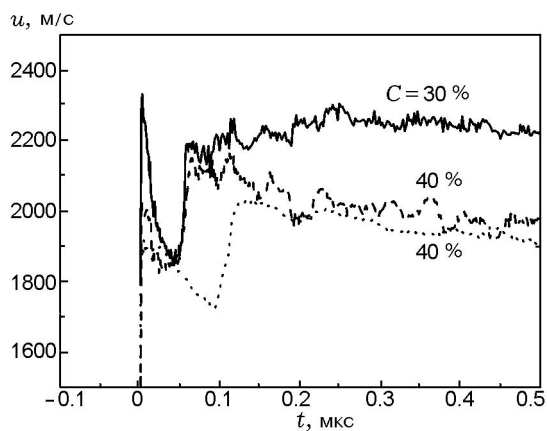


Рис. 4. Профили скорости на границе ФИФО/НБ — водяное окно при использовании алюминиевой фольги толщиной 200 мкм (сплошная и штриховая линии) и 400 мкм (пунктирная линия)

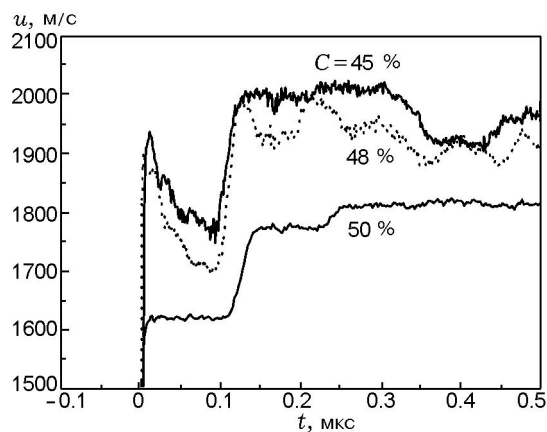


Рис. 5. Профили скорости на границе ФИФО/НБ — водяное окно при концентрации НБ, близкой к критической (толщина фольги 400 мкм)

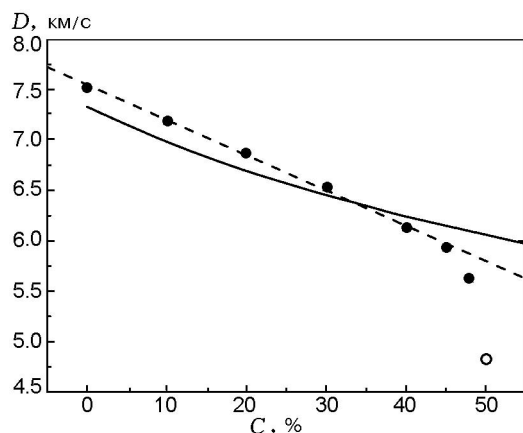


Рис. 6. Зависимость скорости детонации смеси ФИФО/НБ от концентрации НБ

ударных волн в веществах, сжимаемость которых падает с увеличением давления [9].

На рис. 6 показана зависимость скорости детонации D , которая измерялась в каждом опыте, от концентрации нитробензола C . Результаты экспериментов (темные точки на рис. 6) с хорошей точностью аппроксимируются линейной зависимостью $D(C)$ (штриховая линия на рис. 6): $D = 7.55 - 0.035C$. Сплошной линией показана зависимость скорости детонации от концентрации НБ, рассчитанная по схеме, предложенной в работе [10]. Видно, что точка, соответствующая 48 % НБ, лежит заметно ниже этой зависимости, что является следствием затухания детонации. Поэтому критическая концентрация НБ в смеси ФИФО/НБ равна 45 %. Светлой точкой обозначена средняя скорость ударной волны для ФИФО/НБ 50/50. Отметим также, что наблюдаемое на рис. 6 согласие экспериментальных данных с расчетом (сплошная линия) следует признать удовлетворительным.

Измеренные параметры детонации смеси ФИФО/НБ, и в частности массовая скорость и давление в химике, приведены в таблице. Необходимо отметить, что при концентрации НБ 30 % и выше значения u_{sh} и p_{sh} могут быть занижены, поскольку в этих экспериментах использовалась толстая фольга (400 мкм), при распространении по которой пик скорости затухает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определена зависимость параметров детонации смеси ФИФО/НБ от концентрации НБ и показано, что как в чистом ФИФО, так и в растворах, содержащих более 30 % НБ, детонационный фронт неустойчив. Малые добавки НБ (10 ÷ 20 %) резко увеличивают скорость реакции непосредственно за ударным скачком, что приводит к стабилизации фронта. Наблюдаемые особенности структуры зоны реакции при концентрации НБ меньше 30 % обусловлены, вероятно, реакцией во фронте ударной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
2. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
3. 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. — P. 710–722.
4. 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.
5. Вильямс Ф. М. Теория горения. — М.: Наука, 1971.
6. 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.
7. Зайдель Р. М. Об устойчивости детонационных волн в газовых смесях // Докл. АН СССР. — 1961. — Т. 136, № 5. — С. 1142–1145.
8. 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.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.
10. Махов М. Н., Пепекин В. И., Лебедев Ю. А. Метод расчета параметров детонации взрывчатых веществ // Пятый Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву: тез. докл. — Черноголовка, 1977. — С. 88.