

УДК 541.126

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ, ПАРАМЕТРОВ ПИКА НЕЙМАНА И СОСТОЯНИЯ В ПЛОСКОСТИ ЧЕПМЕНА — ЖУГЕ В ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

А. В. Фёдоров, А. Л. Михайлов, Л. К. Антонюк, Д. В. Назаров,
С. А. Финюшин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, root@gdd.vniief.ru

Зарегистрированы параметры детонационных волн в гомогенных и гетерогенных взрывчатых веществах, определены зависимости длительности зоны химической реакции от критического диаметра. В жидких взрывчатых веществах исследован переход от устойчивого к неустойчивому режиму детонации, при этом зарегистрирован режим нормальной детонации с затянутым ударным скачком и определен период индукции теплового взрыва.

Ключевые слова: гомогенные и гетерогенные ВВ, зона химической реакции, параметры детонации, параметры пика Неймана и состояния в плоскости Чепмена — Жуге, устойчивый и неустойчивый режимы детонации.

ВВЕДЕНИЕ

Известные экспериментальные данные, полученные различными методами, по параметрам зоны химической реакции (ЗХР), параметрам пика Неймана и состояния в плоскости Чепмена — Жуге (ЧЖ) конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) сильно различаются [1–20]. Это обусловлено тем, что на профиле детонационной волны сложно выделить плоскость ЧЖ. Кроме того, для регистрации параметров пика Неймана необходимы методы с наносекундным временным разрешением, но в большинстве методов это условие не выполняется.

В настоящей работе с помощью лазерного интерферометра Фабри — Перо (ИФП), обладающего наносекундным временным разрешением, проведено исследование параметров детонации индивидуальных и смесевых ВВ на основе октогена, гексогена, тэна, ТАТВ, тротила, монокристаллов тэна и октогена. Приведены экспериментальные данные по величине пика Неймана и состоянию в плоскости ЧЖ, ширине ЗХР. Для смесевых жидких ВВ на основе тетранитрометана, нитрометана и нитробензола в зависимости от состава компонентов зарегистрирован как устойчивый, так и неустойчивый режим детонации.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлена схема экспериментов, в которых лазерным интерферометрическим методом Фабри — Перо регистрировали профиль массовой скорости на границе ВВ/LiF [16–22]. Для получения высокой точности и высокого временного разрешения при регистрации профиля $u_{\text{LiF}}(t)$ используется тонкое (≈ 1 мкм) алюминиевое покрытие, напыленное на монокристалл LiF, которое волна проходит за время 0.15 нс.

Для определения параметров ЗХР, состояния в плоскости ЧЖ и величины пика Неймана использовались заряды ВВ диаметром 120 мм и длиной $40 \div 100$ мм, которые инициировались

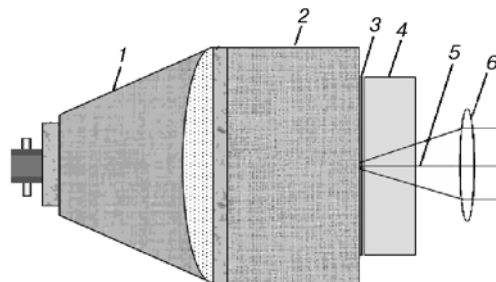


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — плоскостной генератор, 2 — исследуемое ВВ, 3 — алюминиевое покрытие, 4 — окно (LiF), 5 — зондирующее лазерное излучение, 6 — фокусирующая линза

плосковолновым генератором. В ряде экспериментов для определения величины пика Неймана брали заряды меньших размеров. Временное разрешение метода при длине базы ИФП 20 ÷ 200 мм изменялось в диапазоне 0.5 ÷ 10 нс, точность измерения скорости — 80 ÷ 8 м/с.

ГЕТЕРОГЕННЫЕ ВВ

В настоящей работе исследовались прессованные составы ВВ высокой плотности (98 ÷ 99 % от монокристаллической). На рис. 2 представлен участок интерферограммы, полученный с использованием интерферометра ИФП-140, по которому определено значение пика Неймана в прессованном тротиле. Видно, что экспериментальное временное разрешение метода (δt) значительно превышает определенное по классической формуле

$$\delta t = \frac{2L}{c} \left[\frac{\ln(1 - I_p/I_\infty)^{1/2}}{\ln R} - 1 \right], \quad (1)$$

где L — база интерферометра, c — скорость света, R — коэффициент отражения зеркал интерферометра Фабри — Перо. Это связано с тем, что количество света, прошедшего через интерферометр (I_p/I_∞), в формуле принимается равным 90 % ($\delta t = 8$ нс), а реально для формирования интерференционной картины достаточно 30 % света и менее. Из рис. 2 видно, что

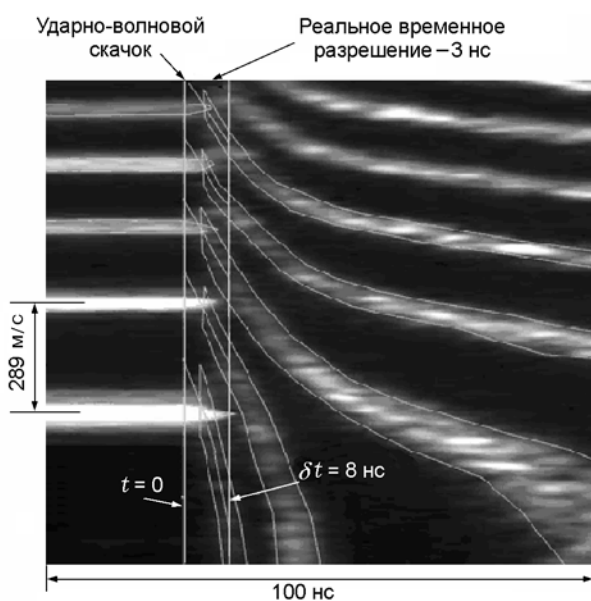


Рис. 2. Определение величины пика Неймана в тротиле с помощью интерферометра ИФП-140

реальное временное разрешение ИФП с базой 140 мм равняется 3 нс. Для ИФП с базой 20 мм ($\delta t = 1.1$ нс) реальное временное разрешение будет составлять 0.5 нс.

Достоинством лазерного интерферометра Фабри — Перо является то, что амплитуда скорости и временные параметры измеряются по 5 ÷ 10 интерференционным линиям, что позволяет в одном эксперименте провести 5 ÷ 10 независимых измерений профилей детонационной волны и значительно повысить точность измерений. Величина пика Неймана определяется линейной (на начальном участке длительностью 10 ÷ 15 нс) или полиномиальной экстраполяцией зависимости массовой скорости $u(t)$ к времени $t = 0$. Обе экстраполяции дают практически одинаковые результаты. Зарегистрированная величина пика в LiF затем с помощью известных ударных адиабат ВВ и LiF пересчитывалась на состояние ВВ.

Параметры ЧЖ и длительность ЗХР ($t_{\text{ЗХР}}$) в настоящей работе определяли по излому на профиле $u(t)$, ширину ЗХР — по формуле $x_{\text{ЗХР}} = (D - u)t_{\text{ЗХР}}$. Это иллюстрирует рис. 3, на котором представлен профиль $u(t)$ для заряда пластифицированного октогена состава 90/10 длиной 80 мм, диаметром 120 мм ($d_{\text{кр}} \approx 1$ мм).

Длительность ЗХР по результатам пяти опытов с зарядами длиной 40 ÷ 100 мм составила 95 ± 15 нс, давление в плоскости ЧЖ $p_{\text{ЧЖ}} = 39.2$ ГПа. Аналогично получены результаты для составов на основе гексогена, тэна, тротила и ТАТВ.

В настоящей работе толщину и диаметр

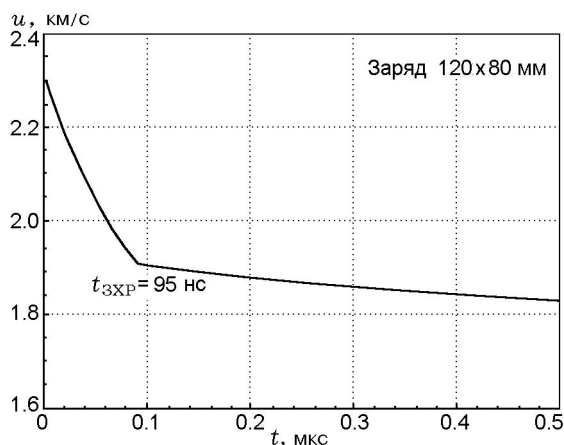


Рис. 3. Профиль $u(t)$ для пластифицированного октогена состава 90/10

Таблица 1

| ВВ | $p_{\text{ЧЖ}}$, ГПа | $u_{\text{ЧЖ}}$, мм/мкс | $p_{\text{Н}}$, ГПа | $t_{\text{ЗХР}}$, нс | $x_{\text{ЗХР}}$, мм | k |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| Тротил | 19.1 | 1.7 | 24.9 | 305 | 1.6 | 3.08 |
| Тротил/гексоген 30/70 | 30.4 | 2.16 | 38.4 | 75 | 0.41 | 2.75 |
| Октоген 90/10 | 39.2 | 2.39 | 47.8 | 95 | 0.6 | 2.64 |
| Тэн 83/17 | 23.2 | 2.16 | 34.5 | 4 | 0.022 | 2.61 |
| ТАТВ 90/10 | 25.9 | 1.80 | 33.8 | 620 | 3.6 | 3.22 |

Таблица 2

| Монокристалл ВВ | ρ , г/см ³ | D , км/с | $p_{\text{ЧЖ}}$, ГПа | $u_{\text{ЧЖ}}$, мм/мкс | $p_{\text{Н}}$, ГПа | $t_{\text{ЗХР}}$, нс | $x_{\text{ЗХР}}$, мм | k |
|-----------------|----------------------------|------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| Октоген | 1.904 | 9.8 | 43 | 2.48 | 63.9 | 265 | 1.76 | 2.95 |
| Тэн | 1.774 | 8.3 | 28 | 1.88 | 35.4 | 95 | 0.61 | 3.41 |

зарядов выбирали максимально возможными и значительно превышающими критический диаметр детонации $d_{\text{кр}}$. Такая постановка экспериментов позволяла надежно измерить параметры ЧЖ и ЗХР. При малых размерах зарядов, согласно [10], измеряются не истинные параметры ЧЖ и ЗХР, а заниженные (эффективные), причем чем меньше размеры зарядов, тем ниже регистрируемые значения данных параметров. Например, для октогена и составов на его основе эффективное давление ЧЖ может составлять $30 \div 36$ ГПа, а длительность ЗХР — $10 \div 50$ нс [14].

Зарегистрированные параметры детонационных волн для индивидуальных и пластифицированных ВВ представлены в табл. 1, где $p_{\text{ЧЖ}}$, $u_{\text{ЧЖ}}$ — давление и массовая скорость в состоянии ЧЖ, $p_{\text{Н}}$ — давление в пике Неймана, $t_{\text{ЗХР}}$, $x_{\text{ЗХР}}$ — длительность и ширина ЗХР, k — показатель политропы.

Из таблицы видно, что для наиболее чувствительного пластифицированного тэна состава 83/17 получена минимальная длительность ЗХР — 4 нс и, наоборот, для малочувствительного ТАТВ 90/10 длительность ЗХР оказалась максимальной — 620 нс. Величина пика Неймана для исследуемых гетерогенных ВВ составила $24.9 \div 47.8$ ГПа, давление ЧЖ — $19.1 \div 39.2$ ГПа.

МОНОКРИСТАЛЛЫ ВВ

Исследованы детонационные свойства монокристаллов тэна в малочувствительной кристаллографической ориентации (100) и октогена в высокочувствительной кристаллографиче-

ской ориентации (111) [21] в области их детонационных давлений. Монокристаллы ВВ имели толщину $2 \div 14$ мм.

Инициирование монокристаллов проводилось детонационной волной от промежуточного заряда ВВ, давление детонации которого близко к давлениям детонации монокристалла. Для уменьшения боковой разгрузки монокристаллы ВВ были окружены обоймами из пластифицированных ВВ с близкими детонационными свойствами. Результаты исследований представлены в табл. 2.

В монокристаллах по сравнению с гетерогенными ВВ существенно увеличивается длительность ЗХР. Это связано с тем, что в монокристаллах нет пор и зазоров и существенно меньше количество горячих точек, чем в гетерогенных ВВ. Горячими точками в монокристалле ВВ являются полосы локализованного адиабатического сдвига с разрывом молекулярных связей из-за движения краевых дислокаций [23–27].

В монокристалле тэна при нагружении вдоль малочувствительного направления (100) величина пика Неймана ($p_{\text{Н}} = 35.4$ ГПа) практически совпала со значениями для пластифицированного тэна 83/17 ($p = 34.5$ ГПа) и пресованного высокоплотного тэна ($p = 35.4$ ГПа), в то время как давление детонации в монокристалле возросло на 20 % по сравнению с составом 83/17 — с 23.2 до 28 ГПа. В высокочувствительном кристаллографическом направлении октогена (111) зарегистрированы высокие параметры детонации ($p_{\text{Н}} = 63.9$ ГПа, $p_{\text{ЧЖ}} = 43$ ГПа). Пик Неймана оказался существенно

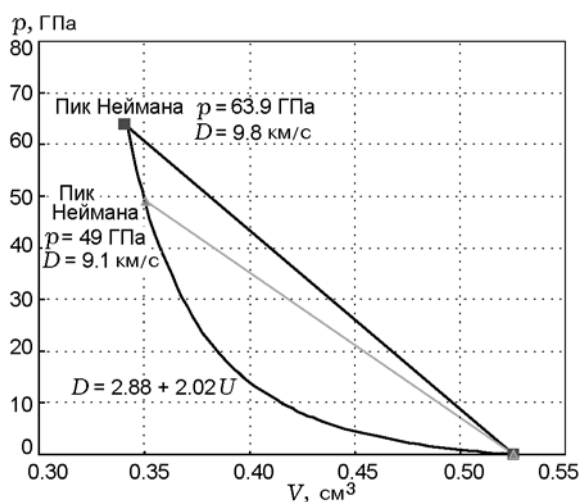


Рис. 4. Зависимость $p(V)$ для монокристалла октогена

выше, чем в высокоплотном прессованном и агатированном ($\rho_0 = 1.88 \div 1.89 \text{ г/см}^3$) октогене ($p_H = 49 \text{ ГПа}$) [17]. По-видимому, как и в тэне, для малочувствительного направления монокристалла октогена (100) величина пика Неймана близка к таковой для высокоплотного прессованного ВВ ($p = 49 \text{ ГПа}$). В работах [23–25] показано, что ударная сжимаемость монокристалла не зависит от кристаллографического направления, следовательно, данные пика Неймана для ориентаций (100) и (111) $p_H = 49$ и 63.9 ГПа лежат на одной ударной адиабате. Построенные ударная адиабата и детонационные лучи представлены на рис. 4. Из рисунка следует, что значения скорости детонации монокристалла октогена в разных кристаллографических направлениях существенно различаются: $D = 9.1 \text{ км/с}$ для малочувствительного и $D = 9.8 \text{ км/с}$ для высокочувствительного направления.

Ранее мы считали, что скорость детонации монокристалла октогена одинакова для всех кристаллографических направлений ($D = 9.1 \text{ км/с}$), и получили заниженные значения величины пика Неймана в направлении (111) $p_H = 60.9 \text{ ГПа}$, $u = 3.51 \text{ км/с}$ [21].

По определенным в настоящей работе параметрам ЗХР и известным значениям $d_{кр}$ [1–15, 23–25, 28–30] на рис. 5 построены две зависимости для монокристаллических и гетерогенных ВВ, которые позволяют оценивать один параметр при известном другом. Видно, что данные для составов на основе октогена, гексогена, тротила, тэна, ТАТВ лежат на одной

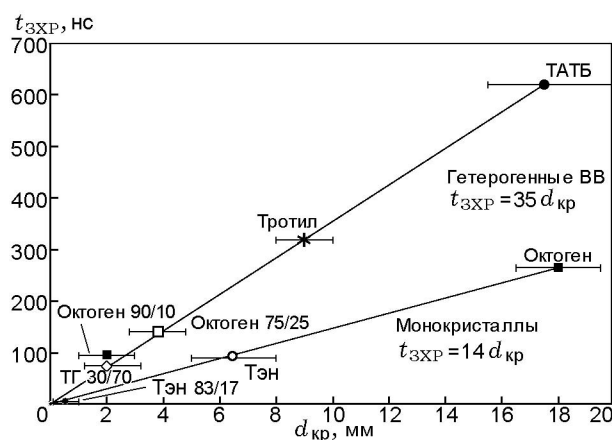


Рис. 5. Зависимость длительности ЗХР от критического диаметра ВВ

прямой. Таким образом, существует линейная зависимость между длительностью ЗХР и критическим диаметром: $t_{ЗХР} = 35d_{кр}$ для гетерогенных ВВ, $t_{ЗХР} = 14d_{кр}$ для монокристаллических.

ЖИДКИЕ ВВ

В экспериментах исследовалась устойчивость детонационного фронта и определялись параметры детонации высокочувствительных смесевых жидких ВВ на основе тетранитрометана (ТНМ), нитробензола (НБ) и нитрометана (НМ). Впервые исследование устойчивости детонационного фронта по отношению к малым возмущениям провел К. И. Щёлкин [31, 32]. В его работах было показано, что в большинстве случаев при детонации газов фронт является неустойчивым и на пределах распространения возникает спиновая детонация.

Смесевые жидкие ВВ на основе горючего (НБ, НМ) и окислителя (ТНМ) помещались в кювету из оргстекла диаметром $6 \div 15 \text{ мм}$, длиной до 100 мм . Во всех исследуемых составах ТНМ/НБ (95/5, 90/10, 85/15) при давлении инициирующей ударной волны 17 ГПа был зарегистрирован устойчивый детонационный фронт с давлением пика Неймана, близким к его величине в ТНМ ($\rho_0 = 1.64 \text{ г/см}^3$; $D = 6.36 \text{ км/с}$) — $p_H = 21.6 \text{ ГПа}$. Для стехиометрического состава ТНМ/НМ 46/54 ($\rho = 1.365 \text{ г/см}^3$, $D = 6.89 \text{ км/с}$) также зафиксирован устойчивый фронт и параметры пика Неймана $p_H = 24.2 \text{ ГПа}$, $u_H = 2.57 \text{ мм/мкс}$.

Известно, что критическое давление инициирующей ударной волны в ТНМ составляет

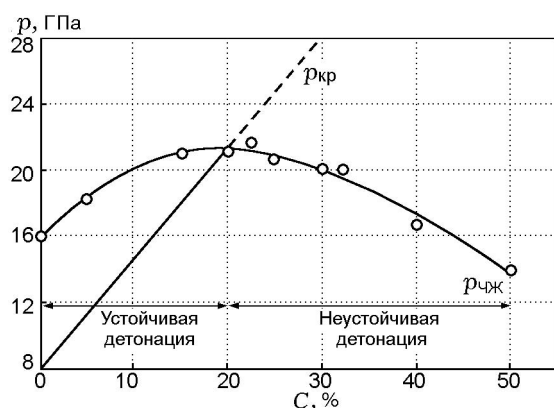


Рис. 6. Зависимость $p_{\text{ЧЖ}}$ и $p_{\text{кр}}$ от концентрации нитробензола в смеси ТНМ/НБ

$p_{\text{кр}} = 8$ ГПа при давлении детонации 16 ГПа [1–6]. При массовой концентрации НБ $C = 20 \div 50$ % в исследуемых составах ТНМ/НБ зарегистрирован неустойчивый, пульсирующий фронт. По-видимому, в данных составах при увеличении НБ (нитробензол не детонирует) растет критическое давление инициирующей ударной волны. В то же время в соответствии с [7] растут скорость D и давление детонации $p_{\text{ЧЖ}}$. На рис. 6 представлены зависимость $p_{\text{ЧЖ}}(C)$ и предполагаемая зависимость $p_{\text{кр}}(C)$. В составах ТНМ/НБ, где $C \leq 20$ %, критическое давление инициирования еще не превышает давления детонации, поэтому фронт гладкий и устойчивый, а в составах, где $C \geq 20$ %, фронт пульсирующий и неустойчивый. При дальнейшем увеличении НБ (более 50 %), как показано в [33], при достижении предела

распространения детонации по концентрации детонация прерывается.

Физика возникновения и распространения пульсирующей детонации жидких ВВ детально описана в работах А. Н. Дрёмина [1–6]. Отметим, что для состава ТНМ/НБ 74/26 ($\rho = 1.51$ г/см³, $D = 7.5$ км/с) максимальное значение параметров детонации в пульсирующем фронте составило $p = 55$ ГПа (при $p_{\text{ЧЖ}} = 21.4$ ГПа) [22, 34]. Это обусловлено распространением косых детонационных волн, движущихся по ударно-сжатому ВВ.

Известно, что пересжатая детонация подавляет пульсации детонационного фронта. На рис. 7 представлены профили пересжатых детонационных волн, которые через алюминиевую фольгу (0.1 мм) проходили в заряд жидких ВВ ТНМ/НБ 74/26 длиной $10 \div 15$ мм от более мощного инициирующего заряда. При инициировании от пластифицированного тэна 83/17 давление в жидких ВВ составило 26 ГПа, от пластифицированного октогена 90/10 — 31 ГПа.

При увеличении длины заряда жидких ВВ (h) пересжатый режим детонации (рис. 7, а) ослабевает и переходит в пульсирующий. На промежуточной длине заряда $h = 50$ мм при затухании пересжатого режима и его переходе к неустойчивому режиму с пульсациями был зарегистрирован профиль нормальной детонационной волны с пиком Неймана и состоянием ЧЖ в соответствии с моделью Зельдовича — Неймана — Дёринга (рис. 8). Давление пика Неймана в исследуемом составе $p_{\text{Н}} = 34$ ГПа, давление в состоянии ЧЖ $p_{\text{ЧЖ}} = 21.4$ ГПа. Длительность нарастания массовой скорости

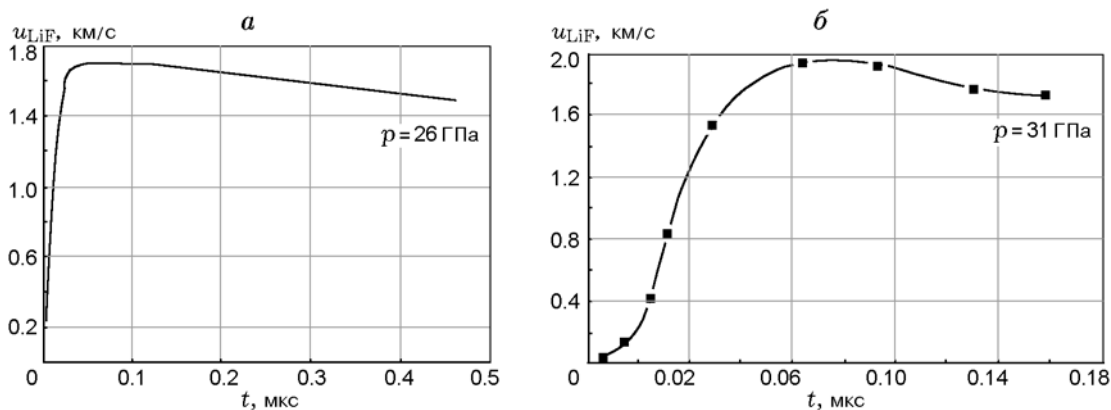


Рис. 7. Профили пересжатых детонационных волн

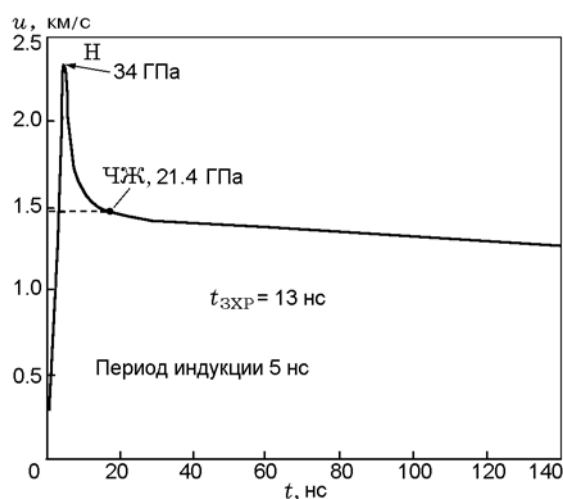


Рис. 8. Профиль детонационной волны в смеси ТНМ/НВ 74/26

во фронте до пика Неймана составила ≈ 5 нс, длительность зоны химической реакции от пика Неймана до состояния ЧЖ $t_{ЗХР} \approx 13$ нс. Затем на профиле регистрируется тейлоровская волна разгрузки. Время нарастания параметров детонации до пика Неймана (5 нс) является, вероятно, периодом индукции теплового взрыва и обусловлено медленной кинетикой химической реакции при $p_{кр} > p_{ЧЖ}$. По-видимому, и для нормального режима Зельдовича — Неймана — Дёринга в большинстве конденсированных ВВ в ударном скачке существует период индукции, но из-за быстрой кинетики энерговыделения он крайне мал — примерно $10^{-11} \div 10^{-12}$ с, что не позволяет его разрешить современными методами регистрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для гомогенных и гетерогенных ВВ зарегистрированы профили массовой скорости и измерены параметры детонационных волн. В исследуемых гетерогенных ВВ длительность зоны химической реакции лежит в пределах $4 \div 620$ нс, давление пика Неймана — $25 \div 49$ ГПа, давление детонации — $19 \div 39$ ГПа.

Показано, что в монокристаллах октогена скорость детонации и параметры пика Неймана ($D = 9.8$ км/с, $p_H = 63.9$ ГПа) в высокочувствительном кристаллографическом направлении выше, чем в малочувствительном ($D = 9.1$ км/с, $p_H = 49$ ГПа). Для гомогенных и гетерогенных ВВ определены зависимости дли-

тельности зоны химической реакции от критического диаметра.

Показано, что в жидких смесевых ВВ в том случае, когда критическое давление инициирующей ударной волны превышает давление детонации, устойчивый детонационный фронт переходит в пульсирующий, неустойчивый. При переходе пересжатого режима детонации в неустойчивый режим зарегистрирован нормальный режим детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга с нарастанием параметров детонации во фронте длительностью 5 нс, что, по-видимому, является периодом индукции теплового взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Савров С. Д. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
2. Дремин А. Н. Пульсирующий детонационный фронт // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 159–169.
3. Dremin A. N. Toward Detonation Theory. — Springer, 1999.
4. Дремин А. Н., Шведов К. К. Исследование зоны химической реакции тротила // ПМТФ. — 1964. — № 2. — С. 154.
5. 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.
6. Dremin A. N. et al. On the detonation failure diameter of the dina/acetonitril solution // Proc. 11th Intern. Detonation Symp., 1998, Snowmass. — P. 1017–1022.
7. Зотов Е. В. Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004.
8. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002.
9. Гоголя М. Ф., Бражников М. А., Долгобородов А. Ю. Особенности детонации пресованных зарядов октогена // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 4. — С. 83–86.
10. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. — М.: Мир, 1985.
11. Ашаев В. К., Доронин Г. С., Левин А. Д. О структуре детонационного фронта в конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 1. — С. 95–99.
12. Уткин А. В., Колесников С. А., Першин С. В. Влияние начальной плотности на структуру детонационных волн в гетерогенных взрывчатых веществах // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 5. — С. 111–118.

13. **Соснин В. А., Колганов Е. В.** Исследование процесса детонации в эмульсионных промышленных взрывчатых веществах // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 8. — С. 100–107.
14. **Альтшулер Л. В., Доронин Г. С., Жученко В. С.** Режимы детонации и параметры Жуге конденсированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 2. — С. 84–103.
15. **Шведов К. К.** Некоторые вопросы детонации конденсированных взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2004. — Т. 23, № 1. — С. 27–49.
16. **Fedorov A. V., Mikhailov A. L., Nazarov D. V., et al.** Shock wave initiation of mixture liquid explosives // Shock Compression of Condensed Matter, Baltimor, 2005. — Pt 2. — P. 960–963.
17. **Федоров А. В.** Параметры пика Неймана и структура фронта детонационной волны конденсированных ВВ // Хим. физика. — 2005. — № 10. — С. 13–22.
18. **Fedorov A. V.** Detonation wave structure in liquid homogeneous, solid heterogeneous and agitated he // XII Intern. Detonation Symp., San Diego, Aug. 11–16, 2002.
19. **Федоров А. В., Меньших А. В., Ягодин Н. Б.** Структура детонационного фронта в гетерогенных ВВ // Хим. физика. — 1999. — Т. 18, № 11. — С. 64–68.
20. **Fedorov A. V.** Experimental investigation of heterogeneous he decomposition mechanism in detonation wave front // Shock Compression of Condensed Matter, Atlanta, 2001. — Pt 2. — P. 910–913.
21. **Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. К., Назаров Д. В., Финюшин С. А.** Определение параметров детонационных волн в монокристаллах тэна и октогена // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 5. — С. 106–116.
22. **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. — P. 205–215.
23. **Dick J. J., Mulford R. N., Spencer W. J., Pettit D. R., Garcia E., Shaw D. C.** Shock response of pentanitrate singl crystals // J. Appl. Phys. — 1991. — V. 70, N 7. — P. 3572.
24. **Dick J. J., Ritchie J. P.** Molecular mechanics modeling of shear and the crystal orientation dependence of the elastic precursor shock strength in PETN // J. Appl. Phys. — 1994. — V. 76, N 5. — P. 2726.
25. **Dick J. J., Yoo C. S., Holmes N. C., Soures P. C., Wu C. J., Ree F. H.** Anomalous shock initiation of detonation in PETN crystals // J. Appl. Phys. — 1997. — V. 81, N 2. — P. 601.
26. **Frances F. M.** Pressure dependence on the reaction propagation rate of PENT at high pressure // Proc. Tenth Intern. Detonation Symp., July 12–16, 1993. — P. 579–585.
27. **Кузьмицкий И. В., Гатилов Л. А.** Уравнения состояния для пластифицированного тэна с учетом фазового перехода на основе американских данных и опытов ИФВ // Междунар. конф. «Ударные волны в конденсированных средах» / под ред. В. Ю. Клименко, М. А. Хусаинова. — Санкт-Петербург; Новгород, 2010. — С. 161–165.
28. **LASL Explosive Property Data** / T. R. Gibbs, A. Popolato (Eds). — Berkeley: Univ. of California, 1980.
29. **Dobratz V. M.** LLNL Explosives Handbook. — Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. — March 1981.
30. **LASL Shock Hugoniot Data** / S. P. Marsh (Ed.). — Berkeley, 1980.
31. **Щёлкин К. И., Трошин Я. К.** Газодинамика горения. — М.: АН СССР, 1963.
32. **Щёлкин К. И.** Детонация. — М.: Знание, 1968.
33. **Колдунов С. А., Ананьин А. В.** Изменение детонационных свойств нитрометана при разбавлении невзрывчатыми жидкостями // XII Харитоновские тематические научные чтения. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2011.
34. **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.

Поступила в редакцию 9/IX 2011 г.