

## ЗОНЫ РЕАКЦИИ ДЕТонирующих ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. Г. Лобойко, С. Н. Любятинский

РФЯЦ, ВНИИ технической физики, 454670 Снежинск

Путем регистрации свечения ударной волны в хлороформе, помещенном на торце заряда взрывчатого вещества (ВВ), исследованы зоны реакции нормальных и пересжатых детонационных волн в ряде твердых ВВ. Полученные данные позволили сделать некоторые выводы о закономерностях разложения ВВ в детонационной волне. Так, в мощных твердых ВВ определяющую роль в образовании химпика играет гетерогенность заряда. При этом время реакции гетерогенных ВВ коррелирует с давлением Жуге, а не с чувствительностью ВВ. Экспериментальные параметры химпика хорошо согласуются с расчетами по экстраполированной ударной адиабате ВВ. Однако это свидетельствует не о малости доли ВВ, разлагающегося непосредственно на фронте детонации, а об ее плавной зависимости от параметров фронта. В пересжатых детонационных волнах повышение давления пересжатия сопровождается увеличением доли ВВ, разлагающегося непосредственно на фронте, и при достаточно большом повышении давления химпик совершенно исчезает. В ТАТБ и ВВ на основе ТАТБ это происходит при давлении 40 ГПа.

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно модели детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга [1–3] детонационное превращение взрывчатого вещества (ВВ) осуществляется под действием ударной волны, возбуждающей в заряде ВВ экзотермическую химическую реакцию, энергия которой идет на поддержание процесса (рис. 1). Предполагается, что детонационная волна состоит из распространяющейся по ВВ ударной волны (точка  $F$ ), за которой следует зона реакции, оканчивающаяся плоскостью Жуге (точка  $J$ ), где сумма массовой скорости и скорости звука равна скорости детонации. Данное условие, называемое условием Жуге, выполняется в точке касания в плоскости  $p - v$  прямой Михельсона, выходящей из начального состояния (точка  $O$ ), и адиабаты Гюгонио продуктов взрыва. Вследствие законов сохранения массы и импульса последовательность состояний, реализующихся в зоне реакции, представляет собой прямую линию ( $FJ$ ) на рис. 1, *а*. Конкретная структура зоны реакции определяется кинетикой разложения ВВ и не может быть определена из гидродинамического рассмотрения. Это определяет важность экспериментальных исследований зоны реакции.

Первое экспериментальное доказательство справедливости модели Зельдовича — Неймана — Дёринга для твердых ВВ было получено Даффом и Хьюстоном [4], которые измери-

ли зависимость скорости свободной поверхности алюминиевой преграды ( $W$ ), контактирующей с детонирующим зарядом взрывчатого состава В (ТНТ/гексоген 36/64), от ее толщины  $l$ . Полученная ими зависимость  $W(l)$  полностью соответствовала структуре детонационного фронта в модели Зельдовича — Неймана — Дёринга. Используя известное уравнение состояния алюминия, они рассчитали давление Жуге, давление фронта и длину зоны реакции:  $p_J = 27,2$  ГПа,  $p_f = 38,5$  ГПа,  $p_f/p_J = 1,42$ ,  $X_J = 0,13$  мм.

Работа [4] оказалась классической: она не только определила наиболее перспективный способ исследования структуры зоны реакции (измерение параметров ударной волны, форми-

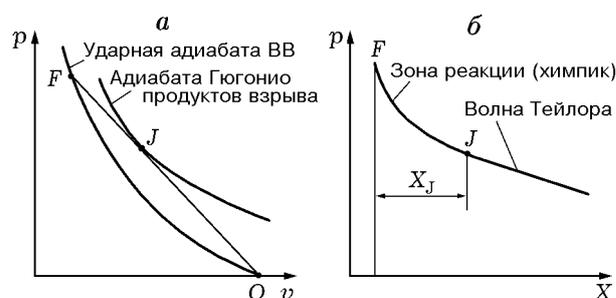


Рис. 1. Структура стационарной плоской детонационной волны в плоскостях  $p - v$  (*а*) и  $p - X$  (*б*) согласно модели Зельдовича — Неймана — Дёринга

рующей в преграде при отражении от нее детонационной волны), но и указала на основной источник ошибок — как в зоне реакции детонационной волны, так и за ней имеет место плавное уменьшение градиента давления без каких-либо разрывов. При этом определению толщины преграды, соответствующей состоянию Жуге, весьма затруднительно (особенно при дискретных измерениях). Полученное Даффом и Хьюстоном значение длины зоны реакции  $X_J = 0,13$  мм соответствовало, по их мнению, быстрой стадии разложения ВВ, в то время как полному разложению ВВ могло соответствовать в несколько раз большее значение  $X_J$ . Эта неопределенность в выборе толщины преграды, соответствующей плоскости Жуге, является, по-видимому, основной причиной большого разброса (от 0,13 до 0,4 мм [5]) значений длины зоны реакции детонации состава В, полученных впоследствии различными исследователями.

В последующие годы было опубликовано большое число работ [6–10 и др.], посвященных исследованию зоны реакции детонирующих ВВ. Особенно плодотворными оказались восьмидесятые годы, когда появилось множество экспериментальных методов, обладающих высоким временным разрешением:

- метод вспыхивающих промежутков [11, 12] и метод лазерного измерения волновых скоростей [11–14], позволяющие регистрировать распространение ударных волн в контактирующих с зарядами ВВ слоистых прозрачных преградах с микронными зазорами между слоями;
- метод замкнутых контактов [15], позволяющий регистрировать распространение ударной волны в датчиках — пакетах из алюминиевых фольг, контактирующих с зарядами ВВ, по уменьшению их электрического сопротивления;
- лазерный интерферометрический метод измерения скорости тонких металлических фольг, расположенных на границе зарядов ВВ с прозрачными окнами [16–21];
- фотоэлектрический метод регистрации параметров ударной волны в прозрачной среде, контактирующей с зарядом ВВ, по интенсивности излучения фронта ударной волны [22];
- электромагнитный метод с временным разрешением  $\approx 10$  нс [23].

Детальный анализ результатов этих исследований дан в [24]. В большинстве работ, в полном соответствии с моделью Зельдовича — Неймана — Дёринга, на фронте детонации регистрировалась зона повышенных давлений — химпик. В то же самое время отмечались и отклонения от этой классической модели: отсутствие химпика в агатированных ВВ (прессованных в присутствии растворителя до относительной плотности ВВ  $\approx 99$  % и полупрозрачного внешнего вида) [11, 14], наличие внутри химпика зоны индукции толщиной  $\approx 0,1$  мм [15], стационарная недосжатая детонация некоторых ВВ с инертным связующим [11], частичное разложение ВВ на фронте детонации [24]. Таким образом, в 1988 г., когда начались такие исследования, уверенности в справедливости модели Зельдовича — Неймана — Дёринга для всех твердых ВВ не было. Необходимо было найти ответы на следующие вопросы:

- во всех ли твердых ВВ на детонационном фронте существует зона повышенных давлений (химпик), соответствующая зоне реакции;
- каково происхождение зоны повышенных давлений (химпика);
- каковы размеры зоны реакции;
- реализуется ли на детонационном фронте ударное сжатие нереагирующего ВВ, как это принято в модели Зельдовича — Неймана — Дёринга;
- каков порядок реакции разложения ВВ и существует ли задержка реакции, связанная с временем индукции, разгоранием очагов и т. п.

Результатам этих исследований, частично опубликованным ранее в работах [25–30], посвящена настоящая статья.

## СТРУКТУРА ЗОНЫ РЕАКЦИИ НОРМАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ

Исследование зоны реакции детонации осуществлялось путем регистрации профиля интенсивности излучения фронта ударной волны в индикаторной жидкости, помещенной на торце детонирующего ВВ, при помощи фотоэлектрической методики, также известной как индикаторная методика [31]. Этот метод, основанный на электронно-оптическом методе измерения температур [32], был разработан в

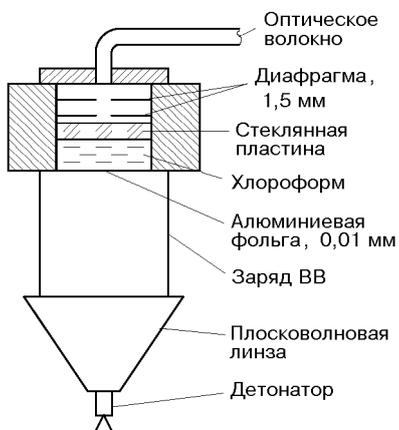


Рис. 2. Схема исследования зоны реакции детонации

1977 г. [33] после обнаружения подходящих индикаторных жидкостей ( $CCl_4$  и т. п.), становящихся непрозрачными в ударных волнах, и определения для них температуры ударного сжатия как функции давления [34]. В 1984 г. фотоэлектрическая методика была впервые использована для исследования зон реакции детонации некоторых твердых ВВ [22]. Методика [22] имела временное разрешение 30 нс, недостаточное для исследования зон реакции октогена, гексогена, а также большинства ВВ на их основе, и была доработана авторами [25–30]. Последний вариант схемы эксперимента показан на рис. 2.

Заряд ВВ инициируется плосковолновой линзой. Алюминиевая фольга, экранирующая излучение детонации, прикреплена к торцу заряда эпоксидной смолой. Диафрагмы ограничивают видимую часть ударного фронта в хлороформе диаметром 3 мм. Излучение ударного фронта передается 1,5-миллиметровым бикомпонентным пластиковым оптическим волокном на фотоумножитель СНФТ-3, подключенный к осциллографу СУР-1. Методом характеристик можно показать, что профиль давления на фронте ударной волны в хлороформе отражает профиль давления в детонационной волне (рис. 3).

Данным методом были исследованы литой и прессованный ТНТ, гексоген, октоген, тэн, ТАТБ, а также ряд ВВ на их основе. Первоначально обработка проводилась следующим образом [30]. Сигнал ФЭУ  $I(t_f)$  (рис. 4) за пределами влияния зоны реакции аппроксимировался выражением

$$I = I_0 + I_1 t_f + I_2 t_f^2.$$

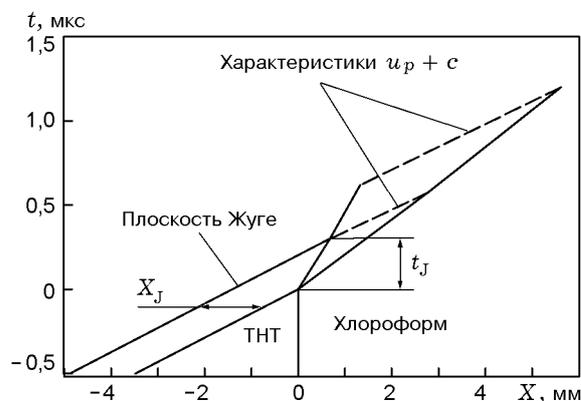


Рис. 3.  $X - t$ -диаграмма взаимодействия зоны реакции с хлороформом

Соответствующие  $I_0$  параметры ударной волны ( $u_{p0}$ ) в хлороформе, создаваемой продуктами взрыва, расширяющимися из состояния Жуге, рассчитывались в предположении политропического приближения для продуктов взрыва путем решения системы уравнений

$$p_0 = \rho_{0,x}(c_{0,x} + S_{1,x}u_{p0})u_{p0},$$

$$p_0 = p_J \left( 1 - \frac{n-1}{2n} \left( \frac{u}{u_J} - 1 \right) \right)^{2n/(n-1)},$$

где  $p_J$ ,  $\rho_J$ ,  $u_J$ ,  $n$  — давление, плотность, массовая скорость и показатель политропы продуктов взрыва в точке Жуге (определенные в предположении нулевой длины зоны реакции),  $\rho_{0,x} = 1,483 \text{ г/см}^3$  — начальная плотность, а  $c_{0,x} = 1,774 \text{ км/с}$  и  $S_{1,x} = 1,367$  — коэффициенты  $(u_s - u_p)$ -соотношения для хлороформа,  $u_s$ ,  $u_p$  — ударная и массовая скорость

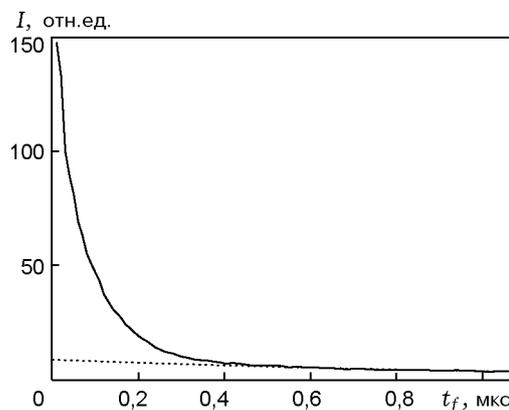


Рис. 4. Типичный сигнал ФЭУ (опыт с прессованным с подплавлением ТНТ)

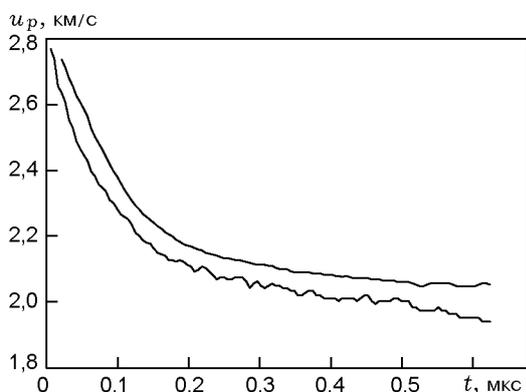


Рис. 5. Типичные профили скорости границы ВВ/хлороформ как функции времени (два опыта с прессованным с подплавлением ТНТ)

сти. Данный подход полностью соответствует обычному способу определения параметров Жуге в предположении нулевой длины зоны реакции. Далее определялась скорость границы ВВ/хлороформ  $u_p(t)$ :

$$u_p = (u_{p0}^{-b} - A \ln(I/I_0))^{-1/b}, \quad (1)$$

$$t = Zt_f, \quad (2)$$

где  $A = 0,039 \pm 0,001$ ,  $b = 1,17$ ,  $Z = 0,52 \pm 0,02$ . Отметим, что конструкция экспериментального узла позволяет также осуществлять калибровку по средней скорости ударной волны в хлороформе на базе от границы ВВ/хлороформ до стеклянной пластины [29].

Для всех исследованных ВВ, кроме агатированных, о которых речь пойдет ниже, был зарегистрирован химпик с временем нарастания 5 нс (временное разрешение метода) (рис. 5). Отсутствие выраженной границы между зоной реакции и волной разрежения Тейлора затрудняло выделение на профиле  $u_p(t)$  точки, соответствующей состоянию Жуге, и косвенно свидетельствовало о незавершенности реакции в плоскости Жуге. Тем не менее для определенности считалось, что зона реакции оканчивается в плоскости Жуге, разделяющей дозвуковую и сверхзвуковую области течения (зону реакции и волну Тейлора), которым, в свою очередь, соответствуют два различных закона затухания ударной волны в хлороформе. Было показано, что с учетом погрешности эксперимента зависимости  $-du_p/dt$  от  $t$  в полулогарифмических координатах представляют собой две прямые линии, причем вторая из них

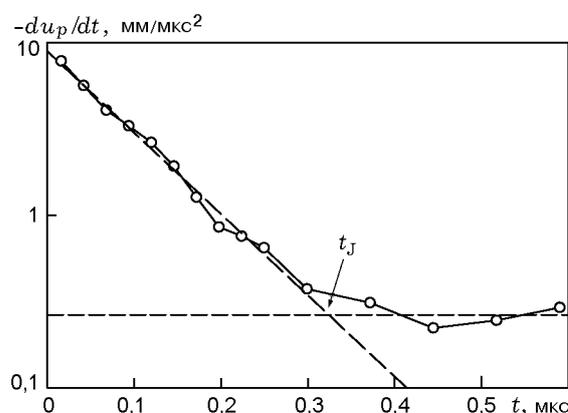


Рис. 6. Производная скорости границы ВВ/хлороформ как функция времени для прессованного с подплавлением ТНТ:

профиль  $u_p(t)$  предварительно осреднен по двум опытам и сглажен

имеет практически нулевой наклон ( $du_p/dt = \text{const}$ ) [25]. Точка пересечения этих прямых, соответствующая плоскости Жуге, определяет время реакции  $t_j$  (время прохождения элемента ВВ от фронта до плоскости Жуге) (рис. 6).

Чтобы избежать появления отрицательных значений  $-du_p/dt$  вследствие шумов ФЭУ, экспериментальные профили  $u_p(t)$  перед дифференцированием должны быть сглажены. Степень такого сглаживания зависит от размеров зоны реакции, уровня шумов ФЭУ и т. п. и определялась индивидуально для каждого ВВ [25–30]. Для перехода к единой методике обработки был предложен следующий способ. Линейность зависимости  $du_p/dt$  от  $t$  в полулогарифмических координатах в зоне реакции указывает на экспоненциальную зависимость  $u_p(t)$  при  $t < t_j$ :

$$u_p = u_{11} + u_{12} \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

где  $\tau$  — характерное время реакции, примерно соответствующее уменьшению количества непрореагировавшего ВВ в  $e$  раз. Постоянство  $du_p/dt$  за зоной реакции указывает на линейную зависимость  $u_p(t)$  при  $t > t_j$ :

$$u_p = u_{p0} + u' t. \quad (4)$$

Здесь  $u_{p0}$  соответствует расчетным параметрам ударной волны, создаваемой в хлороформе продуктами взрыва, расширяющимися из состояния Жуге, а  $u_{11}$ ,  $u_{12}$ ,  $u'$  и  $\tau$  — параметры аппроксимации, которые не являются полностью независимыми, так как в точке  $t_j$  две

Таблица 1

Параметры зон реакции детонирующих ВВ

ВВ	$\rho_0/\rho_{0,cryst}, \%$	Размеры ВВ, мм	$\tau$ , нс	$t_J$ , мкс	$X_J$ , мм
ТНТ(прессованный с подплавлением)	97,9	$\varnothing 60 \times 100$	$91 \pm 14$	$0,33 \pm 0,05$	$1,54 \pm 0,22$
ТНТ (литой)	94,3	$\varnothing 60 \times 100$	$80 \pm 12$	$0,29 \pm 0,04$	$1,36 \pm 0,19$
ТНТ (прессованный)	91,9	$\varnothing 60 \times 100$	$62 \pm 13$	$0,19 \pm 0,04$	$0,87 \pm 0,17$
ТАТБ*	95,4	$\varnothing 60 \times 10$	$103 \pm 15$	$0,31 \pm 0,04$	$1,56 \pm 0,22$
ТАТБ	94,8	$\varnothing 40 \times 80$	$109 \pm 16$	$0,24 \pm 0,03$	$1,18 \pm 0,17$
ТАТБ/инерт	99,1	$\varnothing 120 \times 120$	$99 \pm 21$	$0,26 \pm 0,05$	$1,24 \pm 0,25$
ТАТБ/инерт	99,1	$\varnothing 60 \times 150$	$94 \pm 14$	$0,21 \pm 0,03$	$1,03 \pm 0,14$
Гексоген/ТНТ 50/50	97,6	$\varnothing 60 \times 100$	$33 \pm 7$	$0,13 \pm 0,03$	$0,64 \pm 0,13$
Гексоген/ТНТ 70/30	99,5	$\varnothing 60 \times 150$	$19 \pm 4$	$0,08 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,09$
Октоген/ТНТ 90/10	99,1	$\varnothing 60 \times 150$	$11 \pm 2$	$0,07 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,07$
Октоген/инерт	99,2	$\varnothing 60 \times 150$	$11 \pm 2$	$0,06 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,05$
Октоген/инерт	69,1	$\varnothing 60 \times 50$	$71 \pm 11$	$0,19 \pm 0,03$	$0,80 \pm 0,11$
Гексоген (агатируванный)	98,6	$\varnothing 40 \times 80$	—	$< 0,005$	$< 0,03$
Гексоген	92,4	$\varnothing 40 \times 80$	$15 \pm 3$	$0,07 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,07$
Гексоген	92,4	$\varnothing 40 \times 40$	$12 \pm 3$	$0,05 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,06$
ТЭН (агатируванный)	98,3	$\varnothing 40 \times 80$	—	$< 0,005$	$< 0,03$
ТЭН	97,8	$\varnothing 40 \times 40$	$32 \pm 7$	$0,08 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,08$
ТЭН	91,5	$\varnothing 40 \times 40$	$27 \pm 6$	$0,11 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,10$
Октоген	97,1	$\varnothing 40 \times 80$	$10 \pm 2$	$0,04 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,04$
Октоген	94,7	$\varnothing 40 \times 80$	$15 \pm 2$	$0,06 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,05$
Гексоген/инерт 94/6	99,4	$\varnothing 40 \times 80$	$12 \pm 2$	$0,05 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,04$

Примечание. \* Иницировались зарядом гексоген/ТНТ 70/30 ( $\varnothing 60 \times 150$ ),  $\rho_0/\rho_{0,cryst}$  — относительная плотность.

ветви ((3) и (4)) имеют равенство как значений, так и первых производных. Поскольку соотношение (4) гарантирует равенство  $u_p = u_{p0}$  при  $t = 0$ , отпадает необходимость в предварительном определении области отсутствия влияния зоны реакции и в определении значения  $I_0$  описанным выше способом, а  $I_0$  рассматривается как независимый параметр аппроксимации.

Для каждого опыта профиль  $I(t_f)$  пересчитывался по (2) в  $I(t)$  и при помощи метода Неллиса находились значения параметров  $\tau$ ,  $u'$ ,  $t_J$  и  $I_0$ , соответствующие минимуму  $S_{u_p}$  — среднеквадратического отклонения экспериментального профиля скорости, рассчитанного по (4), от аппроксимирующей зависимости, рассчитанной по (3), (4). При этом соответствующие значения  $u_{11}$  и  $u_{12}$  определялись из условия стыковки двух ветвей функции в точке  $t_J$ . Длина зоны реакции рассчитывалась по формуле, полученной из анализа соответствующей  $X - t$ -диаграммы (см. рис. 3):

$$X_J = \int_0^{t_J} (D - u_p) dt, \quad (5)$$

где  $D$  — скорость детонации ВВ. Средние значения  $\tau$ ,  $t_J$  и  $X_J$  даны в табл. 1.

Погрешности определения параметров зоны реакции оценивались в предположении равенства относительных погрешностей единичного измерения параметров зоны реакции для всех ВВ. Для каждой серии опытов в одной постановке рассчитывались средние значения  $\bar{\tau}$  и  $\bar{t}_J$ , а для каждого опыта в серии — отношение измеренных величин к соответствующим средним значениям:  $\tau/\bar{\tau}$  и  $t_J/\bar{t}_J$ . Таким образом, для каждого из этих параметров было получено 31 значение, которые хорошо описываются нормальным распределением с центром в 1 и дисперсией 0,10. Для доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность средних значений  $\bar{\tau}$  и  $\bar{t}_J$  оцениваются как  $0,20/\sqrt{n}$ , где  $n$  — число опытов в серии.

Таблица 2

Параметры ударных адиабат ВВ вида  $u_s = c_0 + S_1 u_p + S_2 u_p^2$

ВВ	$c_0$ , км/с	$S_1$	$S_2$ , (км/с) <sup>-1</sup>	Источник
ТНТ	2,485	1,835	—	Обработка данных [35–38]
ТАТБ	2,462	2,116	—	Обработка данных [35–37]
Гексоген	2,78	1,9	—	[37]
Тэн	2,87	1,69	—	[37]
Октоген	2,901	2,058	—	[37]
Гексоген/ТНТ	2,868	1,670	—	Обработка данных [35–37]
РВХ-9404	2,494	2,093	—	[37]
ТАТБ/инерт	2,5101	2,4346	-0,1983	[39]

Таблица 3

Параметры детонационного фронта

ВВ	Эксперимент					Расчет		$\frac{u_{f, \text{экс}}}{u_{f, \text{расч}}}$
	$D$ , км/с	$u_J$ , км/с	$u_{pf}$ , км/с	$u_f$ , км/с	$\frac{u_f}{u_J}$	$u_f$ , км/с	$u_{pf}$ , км/с	
ТНТ(прессованный с подплавлением)	6,954	1,730	2,867	2,561	1,48	2,435	2,728	1,05
ТНТ (литой)	6,746	1,678	2,579	2,324	1,38	2,322	2,577	1,00
ТНТ (прессованный)	6,611	1,645	2,511	2,278	1,39	2,249	2,480	1,01
ТАТБ ( $\varnothing 60 \times 10$ )	7,726	2,077	3,029	2,559	1,22	2,488	2,946	1,03
ТАТБ/инерт	7,573	2,114	3,069	2,590	1,28	2,652	3,142	0,98
Гексоген	8,300	2,085	3,140	2,740	1,31	2,905	3,324	0,95
Гексоген/ТНТ 50/50	7,670	2,045	3,252	2,884	1,41	2,875	3,242	1,00
Гексоген/ТНТ 70/30	8,052	2,115	3,266	2,879	1,36	3,104	3,513	0,93
Тэн	7,849	2,236	3,388	3,031	1,36	2,946	3,226	1,03
Октоген	8,920	2,230	3,505	2,939	1,32	2,925	3,489	1,00
Октоген/ТНТ 90/10*	8,790	2,382	3,696	3,129	1,31	3,008	3,556	1,04
Октоген/инерт*	8,684	2,166	3,452	2,912	1,35	2,957	3,505	0,98

Примечание. \* Расчет по  $(u_s - u_p)$ -соотношению для состава РВХ-9404.

Экспериментальные данные по начальным скоростям границы ВВ/хлороформ  $u_{pf}$  позволили проконтролировать ход ударной адиабаты ВВ в области высоких давлений. По известной ударной адиабате ВВ (табл. 2) рассчитывались значения массовой скорости  $u_f$ , представленные в табл. 3, и давления  $p_f$  на детонационном фронте. По ним в предположении симметрии изоэнтропы разгрузки и ударной адиабаты ВВ рассчитывались значения начальных скоростей границы ВВ/хлороформ  $u_{pf}$ , также представленные в табл. 3. Для всех исследованных ВВ экспериментальные и расчетные значения  $u_{pf}$  совпали в пределах погрешности 5 ÷ 10 %. Это примерно соответствует экс-

периментальной погрешности  $u_{pf}$ , которая, в свою очередь, в основном определяется погрешностью определения параметров Жуге, использованных при калибровке. Это подтверждает возможность описания состояния на детонационном фронте ударной адиабатой ВВ не только для низкочувствительных ВВ типа ТНТ или ТАТБ, но и для более чувствительных ВВ на основе октогена. С учетом того факта, что ударные адиабаты ВВ известны лишь в области относительно низких давлений, выше которых мы имеем дело с экстраполяцией, полученные данные были использованы для их уточнения в области высоких давлений. Рассчитанная в предположении симметрии изоэнтропы

разгрузки и ударной адиабаты ВВ, массовая скорость на фронте  $u_f$  хорошо согласуется с экстраполированным по  $(u_s - u_p)$ -зависимостям значением массовой скорости для этих ВВ (см. табл. 3). Таким образом, для исследованных ВВ (за исключением агатированных) массовая скорость на детонационном фронте превышает массовую скорость в точке Жуге на  $20 \div 50 \%$  и с удовлетворительной точностью ( $\approx 10 \%$ ) может быть рассчитана по экстраполированной ударной адиабате ВВ.

Продемонстрированное выше неплохое согласие (погрешность  $\approx 10 \%$ ) между экспериментальной массовой скоростью на детонационном фронте и рассчитанной по экстраполированной ударной адиабате ВВ не доказывает еще отсутствия разложения ВВ на фронте. В качестве примера рассмотрим детонацию ТНТ. В зоне реакции изменение параметров происходит вдоль детонационного луча

$$p = \rho_{0,ВВ} D u_{ВВ}$$

( $\rho_{0,ВВ}$  — начальная плотность ВВ,  $u_{ВВ}$  — их скорость), который касается ударной адиабаты продуктов взрыва в точке Жуге, вследствие чего зависимость доли непрореагировавшего ВВ  $\alpha$  от массовой скорости  $u_{ВВ}$  нелинейная. Зависимость  $\alpha(u_{ВВ})$  можно найти в адиабатическом приближении, используя правило аддитивности, известное  $(u_s - u_p)$ -соотношение и политропическое уравнение состояния продуктов взрыва. Зависимость количества непрореагировавшего ВВ от скорости границы ВВ/хлороформ —  $\alpha(u_p)$  — является еще более нелинейной. Это связано с тем, что в координатах  $p - u$  наклон изоэнтропы расширения ВВ превышает наклон изоэнтропы расширения продуктов взрыва. Нелинейность зависимости  $u_p(u_{ВВ})$  в окрестности пика дополнительно увеличивает нелинейность зависимости  $\alpha(u_p)$ . Из рис. 7 видно, что ошибка в определении  $u_p$  всего лишь в  $0,03$  км/с (т. е.  $1 \%$ ), приводит к ошибке определения  $\alpha$  на  $50 \%$ . Другими словами, определить количество ВВ, реагирующего на фронте, по начальной скорости границы ВВ/хлороформ невозможно.

Точное извлечение кинетики реакции по полученным профилям массовой скорости возможно лишь путем численного моделирования. Однако общие закономерности можно получить более простым путем. Используя экспериментальный профиль  $u_p(t)$  и полученную выше зависимость  $\alpha(u_p)$ , рассчитывали зави-

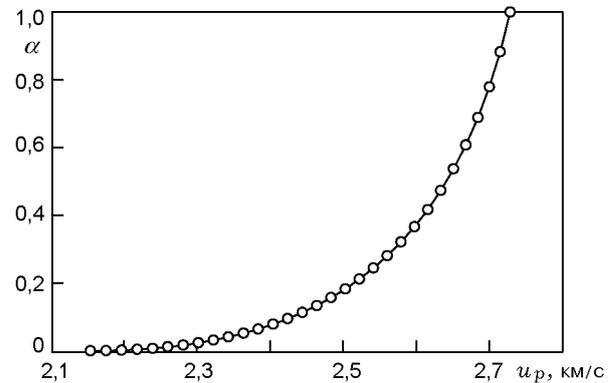


Рис. 7. Массовая доля непрореагировавшего ВВ в зоне реакции ТНТ как функция соответствующей скорости границы ВВ/хлороформ

симостью  $\alpha(t)$  и зависимость производной  $d\alpha/dt$  от  $\alpha$ . Последняя приведена в логарифмических координатах на рис. 8. Видно, что при  $\alpha < 0,5$  данная зависимость практически линейна с наклоном  $1 \div 1,1$ . Аналогичный результат получен и для других ВВ. С учетом погрешности можно считать, что реакция, ответственная за выделение последних  $50 \%$  энергии, имеет первый порядок, т. е. скорость реакции примерно пропорциональна количеству непрореагировавшего ВВ.

Ранее было обнаружено, что в агатированных (прессованных с растворителем до относительной плотности  $\approx 0,99$  и полупрозрачного внешнего вида) зарядах из гексогена и тэна время реакции меньше времени разрешения использованных методик ( $\approx 5$  нс) [14, 27]. Для выяснения причин столь узкой зоны реакции в агатированных зарядах нами были проведены сравнительные измерения зон реакции

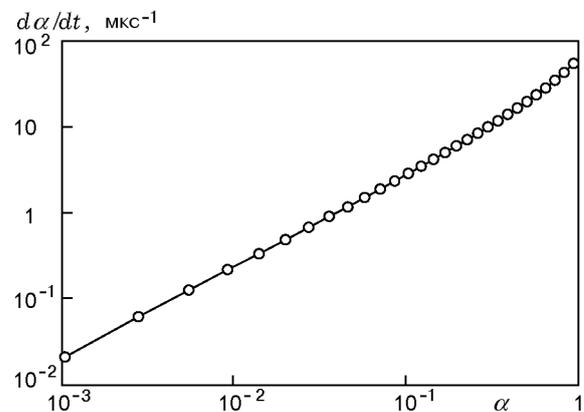


Рис. 8. Зависимость скорости реакции от массовой доли непрореагировавшего ВВ в зоне реакции детонирующего ТНТ

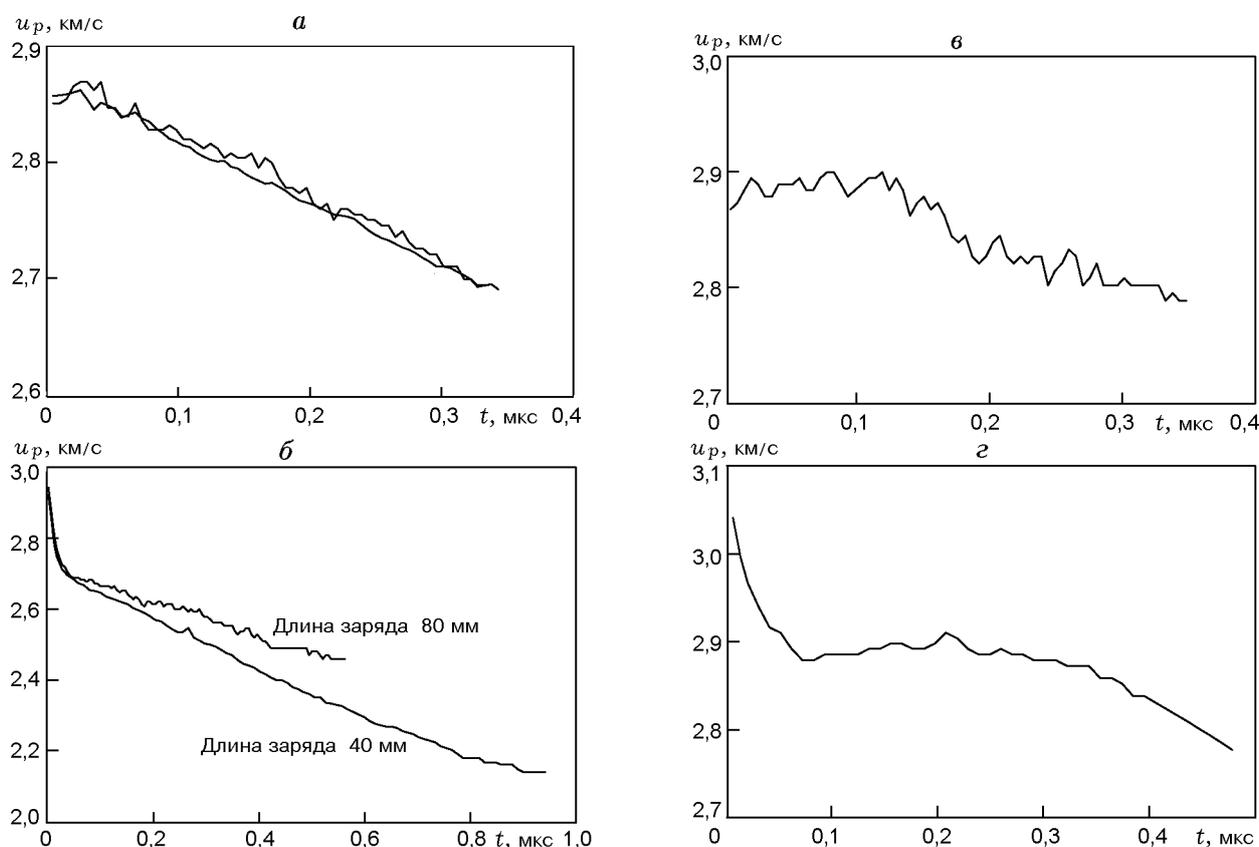


Рис. 9. Скорость границы ВВ/хлороформ как функция времени для агитированного (а) и прессованного (б) гексогена, для агитированного (в) и прессованного (г) тэна

на зарядах из гексогена и тэна, как агитированных, так и прессованных без растворителя, вследствие чего между кристаллами ВВ в зарядах оставались тончайшие воздушные зазоры, а сами заряды были непрозрачными. Согласно представленным на рис. 9 и в табл. 1 данным, неагитированные заряды при относительной плотности  $0,92 \div 0,98$  имеют время реакции  $0,05 \div 0,11$  мкс, а агитированные заряды из тех же ВВ и при близких значениях относительной плотности ( $\approx 0,98$ ) — меньше 5 нс. Поскольку агитированные ВВ характеризуются большой площадью контакта между отдельными кристаллами ВВ и являются практически гомогенными, по крайней мере вблизи поверхности заряда, можно сделать заключение о том, что именно гетерогенность ВВ, а не релаксация колебательно-возбужденных молекул продуктов реакции ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и др.) или коагуляция углерода [40] определяет время реакции ВВ  $\approx 0,1$  мкс.

В общем случае влияние гетерогенности ВВ на протекание реакции в ударных и детонационных волнах может быть объяснено сле-

дующим образом. В той или иной степени все ВВ являются гетерогенными, поскольку содержат поры, трещины, включения, границы зерен и дефекты кристаллической структуры. Это приводит к трехмерной структуре фронта [41, 42], вследствие чего энергия ударного сжатия распределяется неравномерно и возникает некоторое распределение элементов ВВ по температуре на фронте ( $T_f$ ). Высокотемпературная ветвь распределения охватывает элементы ВВ, в которых происходит концентрация энергии ударного сжатия, а температура на фронте выше средней («горячие точки»). Низкотемпературная ветвь распределения охватывает элементы ВВ, которые сжимаются квазиизэнтропически последовательностью ударных волн до давления фронта и имеют температуру на фронте ниже средней («холодные точки»). Можно выделить два основных механизма реакции элементов ВВ в зависимости от температуры на фронте. Если  $T_f > T_{cr}$ , где  $T_{cr} \approx 1000$  К — критическая температура, определяемая типом ВВ и размерами элементов ВВ, то за время  $\approx 1$  нс в элементе ВВ раз-

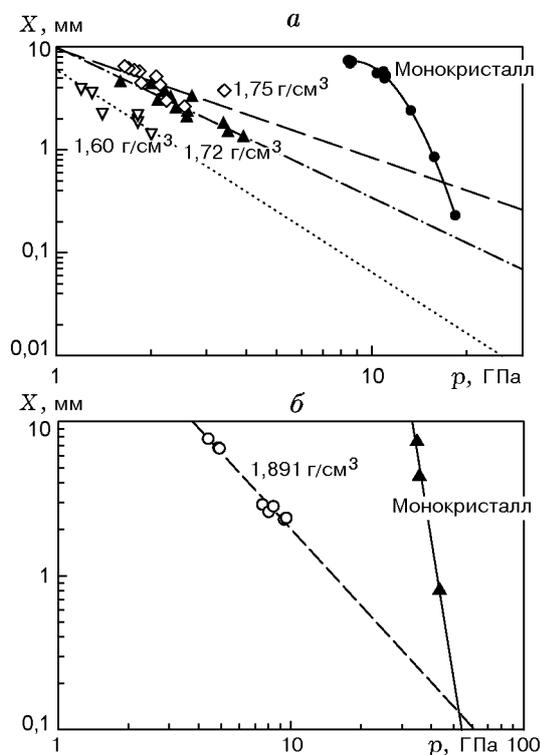


Рис. 10. Зависимость глубины возникновения детонации от давления инициирующей ударной волны для зарядов из тэна различной плотности и структуры [37, 47] (а) и для монокристаллов и прессованных зарядов октогена [37] (б)

вивается тепловой взрыв (воспламенение очага реакции) [43, 44]. Если же  $T_f < T_{cr}$ , реакция начинает протекать с заметной скоростью только после повышения температуры данного элемента ВВ вследствие теплообмена с окружающими горячими продуктами реакции (разгорание очагов реакции). Увеличение давления ударной волны, распространяющейся по ВВ, приводит к увеличению средней температуры ВВ на фронте и, соответственно, доли ВВ, реагирующего по механизму теплового взрыва, т. е. на фронте ударной волны за  $\approx 1$  нс.

Обычно массовую долю ВВ, реагирующего на ударном фронте по механизму теплового взрыва («горячих точек»), считают постоянной и примерно равной пористости ВВ ( $\approx 2\%$ ) [45]. По-видимому, это не совсем так, и массовая доля ВВ, реагирующего на фронте, возрастает с увеличением амплитуды ударной волны. При воздействии относительно слабых ударных волн ( $\approx 5$  ГПа для ВВ типа гексоген) гетерогенность ВВ приводит к образованию «горячих точек», инициирующих реакцию ВВ,

которая в их отсутствие была бы невозможна. Ударная волна, ведущая детонацию в мощных ВВ типа гексогена или тэна, имеет амплитуду  $\approx 50$  ГПа. При этом средняя температура ВВ на фронте оценивается в  $1000 \div 1500$  К [46], что, вероятно, превышает критическую температуру. Для гомогенных ВВ распределение элементов ВВ по температуре на фронте отсутствует и всё ВВ реагирует на фронте. В гетерогенных ВВ существуют элементы ВВ с  $T_f < T_{cr}$ , т. е. «холодные точки». Процесс повышения температуры «холодных точек» до  $T_{cr}$  за счет теплообмена с горячими продуктами разложения и с последующей реакцией определяет, по всей вероятности, время реакции  $\approx 0,1$  мкс.

Влияние гетерогенности просматривается во взаимном расположении зависимостей глубины возникновения детонации от давления инициирующей ударной волны (pop-plots) для монокристаллов и прессованных зарядов из октогена и тэна. Как видно из рис. 10, прессованные заряды легче инициируются в области низких давлений, при повышении давления их чувствительности сравниваются и экстраполяция в область высоких давлений показывает более высокую чувствительность монокристаллов.

Описанный выше механизм реакции предусматривает разложение на фронте ударной волны некоторого количества ВВ, увеличивающегося с ее амплитудой, что хорошо иллюстрируется данными для октогена. Из рис. 11 видно, что хотя ударная адиабата прессованного октогена хорошо описывает состояние на детонационном фронте, она не описывает дан-

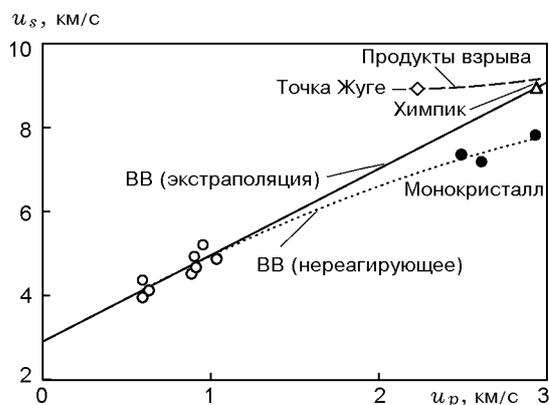


Рис. 11. Ударная адиабата октогена:

○ — данные [37] для прессованного октогена,  
● — данные [37] для монокристаллов октогена,  
△ — состояние на детонационном фронте, зарегистрированное авторами

ные, полученные на монокристаллах, а взаимное положение экспериментальных точек указывает на протекание частичной реакции непосредственно на фронте ударной волны в пресованном октогене.

### СТРУКТУРА ЗОНЫ РЕАКЦИИ ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИИ

Экспериментальные исследования зон реакции стационарных и пересжатых детонационных волн позволяют прояснить вопрос о слиянии ударных адиабат ВВ и продуктов взрыва при повышенных давлениях. Это слияние связано с увеличением доли реагирующего на

фронте ВВ и приводит к исчезновению химика. Данное явление отмечалось для ТНТ и состава LX-17 на основе ТАТБ, но не было ни объяснено, ни использовано для калибровки моделей кинетики реакции ВВ [18, 41]. Оно прогнозируется для различных ВВ в области от  $u_p \approx 2,5$  км/с ( $p \approx 30$  ГПа) для ТНТ до  $u_p \approx 3,4$  км/с ( $p \approx 60$  ГПа) для октогена и ВВ на его основе (см. рис. 12–16). Для ТАТБ и ВВ на его основе это слияние прогнозируется в области  $u_p \approx 2,7$  км/с ( $p \approx 40$  ГПа) (см. рис. 14, 15).

Экспериментальные узлы были разработаны авторами специально для исследования слияния ударных адиабат ВВ и продуктов

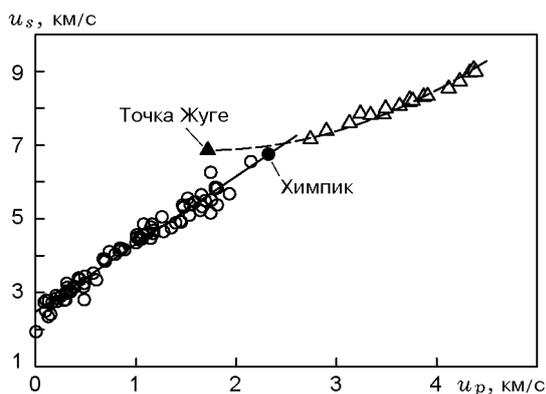


Рис. 12. Ударные адиабаты:  
○ — ТНТ [35–37],  $\Delta$  — продукты взрыва литого ТНТ [48]; состояние на детонационном фронте зарегистрировано авторами на литом ТНТ

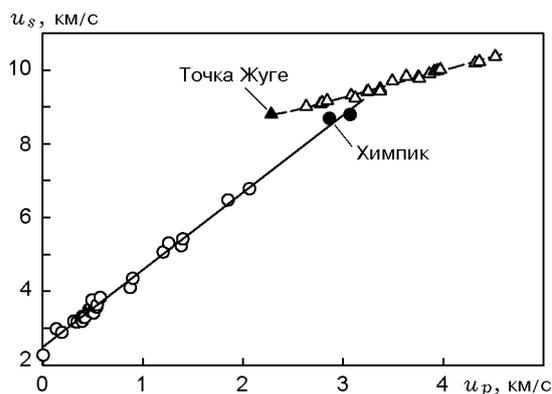


Рис. 13. Ударные адиабаты:  
○ — РВХ-9404 [36],  $\Delta$  — продукты взрыва РВХ-9404 [48]; состояния на детонационном фронте зарегистрированы авторами для ВВ на основе октогена

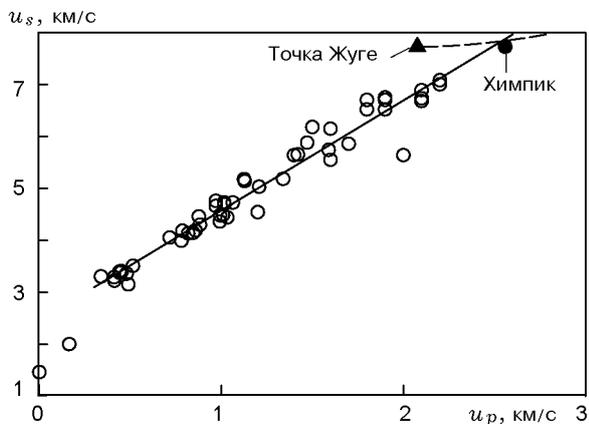


Рис. 14. Ударные адиабаты:  
○ — ТАТБ [35–37], продукты взрыва ТАТБ, расчет по данным [49]; состояние на детонационном фронте зарегистрировано авторами

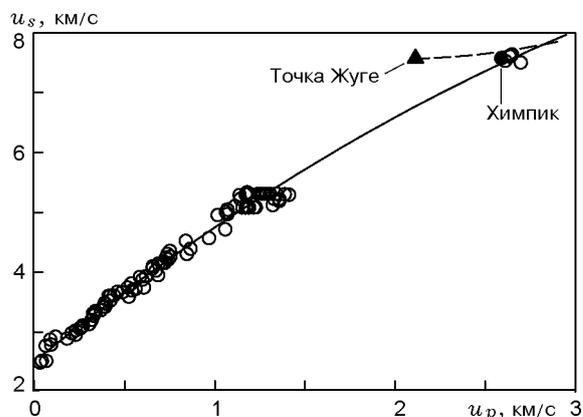


Рис. 15. Ударные адиабаты:  
○ — ТАТБ/инерт [39] и продукты взрыва; состояние на детонационном фронте зарегистрировано авторами

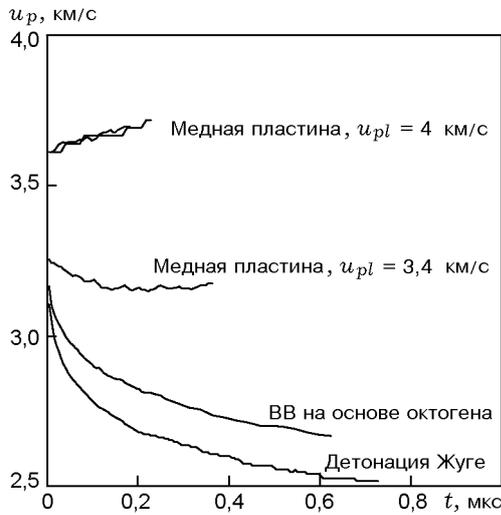


Рис. 16. Типичные профили скорости границы ВВ/хлороформ для ТАТБ/инерт и различных генераторов пересжатой детонационной волны

взрыва, которое предполагалось для ТАТБ и ТАТБ/инерт в области 40 ГПа. Пересжатая детонация создавалась либо зарядом из более мощного состава на основе октогена, либо медной пластиной, разогнанной зарядом ВВ до скорости  $u_{pl} = 3,4$  или  $4$  км/с. После выхода детонации на торец исследуемого заряда в хлороформе создавалась ударная волна, свечение ее фронта регистрировалось фотоэлектрическим методом. Полученные осциллограммы пересчитывались в профили скорости границы ВВ/хлороформ  $u_p(t)$  описанным выше способом. В качестве калибровочной точки использовалась массовая скорость за фронтом ударной волны в хлороформе ( $u_{p,r}$ ), создаваемой продуктами взрыва, расширяющимися из точки

окончания реакции ( $p_r, u_r$ ). Скорость пересжатой детонации рассчитывалась по формуле

$$D_r = p_r / \rho_{0,ВВ} u_r.$$

Для большинства опытов полученные осциллограммы по внешнему виду мало отличались от полученных в опытах с нормальной детонацией и обрабатывались точно так же. Исключение составили опыты, в которых пересжатая детонация создавалась ударом пластины, летящей со скоростью  $u_{pl} = 4,0$  км/с. В этом случае, вероятно вследствие слияния ударных адиабат ВВ и продуктов взрыва, спад на записях  $I(t_f)$  и, соответственно,  $u_p(t)$  отсутствовал и размеры зоны реакции не определялись. Небольшое нарастание скорости границы в этих опытах связано, по-видимому, с влиянием (подпором) продуктов взрыва заряда, разгоняющего 2-миллиметровую медную пластину, вследствие относительно небольшой базы полета пластины (20 мм). В этих опытах калибровочной точке  $I_0$  приписывалось значение первой точки записи  $I(t_f)$ . Типичные профили  $u_p(t)$  приведены на рис. 16. Результаты определения  $\tau, t_J$  и  $X_J$  даны в табл. 4.

Как и в случае стационарной детонации, экспериментальные данные по начальным скоростям границы ВВ/хлороформ  $u_{pf}$  позволили проконтролировать ход ударной адиабаты ВВ в области высоких давлений. Расчетные значения массовой скорости  $u_f$  и давления на детонационном фронте  $p_f$  определялись по известной ударной адиабате ВВ. Значения начальных скоростей границы ВВ/хлороформ  $u_{pf}$ , представленные в табл. 5, рассчитывались в предположении симметрии изоэнтропы разгрузки и ударной адиабаты ВВ. Сравнение расчетных

Таблица 4

Размеры зоны реакции пересжатой детонации

№ п/п	ВВ	$p_r$ , ГПа	$u_r$ , км/с	$D_r$ , км/с	$\tau$ , нс	$t_J$ , мкс	$X_J$ , мм
1*	ТАТБ	29,7	2,08	7,73	$103 \pm 15$	$0,31 \pm 0,04$	$1,56 \pm 0,22$
2		33,1	2,31	7,76	$105 \pm 21$	$0,26 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,25$
3*	ТАТБ/инерт	30,6	2,11	7,53	$99 \pm 20$	$0,26 \pm 0,05$	$1,24 \pm 0,25$
4		33,3	2,30	7,59	$95 \pm 14$	$0,20 \pm 0,03$	$0,91 \pm 0,13$
5		37,8	2,58	7,68	$78 \pm 16$	$0,19 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,17$
6		46,1	3,04	7,94	—	$< 0,005$	$< 0,03$

Примечание. \* Нормальная детонация.

Таблица 5

Параметры зоны реакции пересжатой детонации

№ п/п	ВВ	$p_r$ , ГПа	$D_r$ , км/с	Эксперимент			Расчет	
				$u_{pf}$ , км/с	$u_f$ , км/с	$u_{pf}/u_{pJ}$	$u_f$ , км/с	$u_{pf}$ , км/с
1*	ТАТБ	29,7	7,73	3,029	2,559	1,15	2,488	2,9646
2		33,1	7,76	3,161	2,672	1,12	2,501	2,962
3*	ТАТБ/инерт	30,6	7,53	3,069	2,590	1,16	2,652	3,142
4		33,3	7,59	3,101	2,615	1,10	2,666	3,157
5		37,8	7,68	3,254	2,753	1,03	2,730	3,229
6		46,1	7,94	3,611	3,038	—	2,931	3,452

Примечание. \* Нормальная детонация.

и экспериментальных значений  $u_{pf}$  показывает их совпадение в пределах погрешности  $\approx 5\%$  (погрешность эксперимента). Это подтверждает возможность описания состояния на детонационном фронте ударной адиабатой ВВ. Поскольку ударные адиабаты ВВ известны лишь в области относительно низких давлений, выше которых мы имеем дело с экстраполяцией,

полученные данные могут быть использованы для их уточнения в области высоких давлений. Как видно из табл. 5, полученные таким образом экспериментальные точки ( $u_f, D_r$ ) хорошо согласуются с экстраполированными ( $u_p - u_s$ )-соотношениями для ВВ.

По полученным профилям  $u_p(t)$  определялись общие для ТАТБ и ТАТБ/инерт зависимости следующих величин от давления в конце зоны реакции ( $p_r$ ): времени реакции  $t_J$  и отношения скорости границы ВВ/хлороформ в точке, соответствующей детонационному фронту ( $u_{pf}$ ), к скорости границы ВВ/хлороформ в точке, соответствующей окончанию зоны реакции ( $u_{pJ}$ ). Анализ представленных на рис. 17 зависимостей показывает, что с повышением давления до 40 ГПа химпик исчезает. Время реакции  $t_J$  уменьшается на  $30 \div 50\%$ , что не объясняет исчезновения химпика, которое может быть полностью отнесено на счет слияния ударных адиабат ВВ и продуктов взрыва. Данный вывод согласуется с результатами работ [18, 41] для ТНТ и ВВ LX-17 на основе ТАТБ.

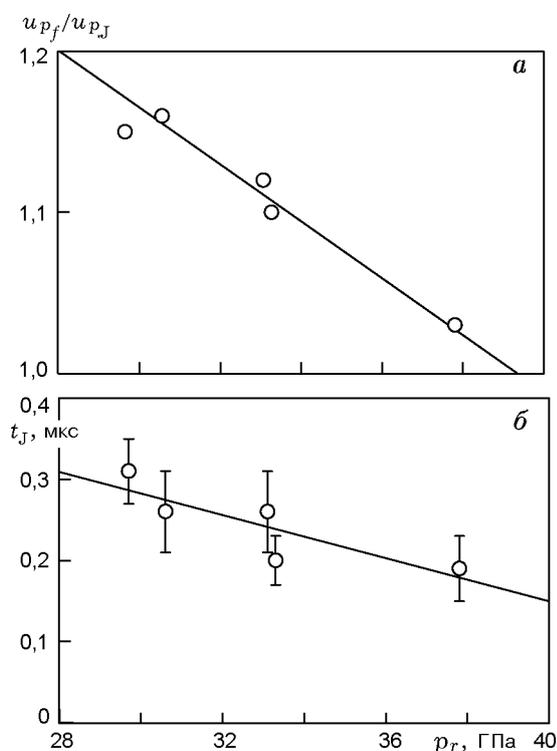


Рис. 17. Параметры зоны реакции пересжатых детонационных волн в ТАТБ (а) и ТАТБ/инерт (б) как функции давления в конце зоны реакции

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В отличие от распространенных представлений параметры зоны реакции детонации не являются некими константами ВВ и точно так же, как и другие газодинамические характеристики ВВ, зависят от множества различных характеристик заряда. Это в значительной степени объясняет расхождения между экспериментальными данными различных авторов.

Влияние структуры зарядов ВВ на размеры зоны реакции весьма заметно и не всегда

поддается объяснению. Так, по данным авторов, размеры зон реакции литого ТНТ и ТНТ, прессованного с подплавлением, приблизительно равны и примерно в полтора раза превышают размеры зоны реакции ТНТ, прессованного без подплавления. Размеры зон реакции агатированных ВВ по крайней мере на порядок меньше зон реакции неагатированных ВВ. В то же время, изменение размера частиц ВВ, а также введение воды практически не сказываются на длине зоны реакции при условии неизменности давления фронта [46]. Аналогично, по нашим данным, изменение среднего размера частиц октогена (что является следствием различных пропорций между крупнодисперсными и мелкодисперсными частицами), а также типа связки (взрывчатая/инерт) практически не влияет на размеры зоны реакции. По-видимому, структура ВВ влияет на размеры зоны реакции через изменение гетерогенности ВВ (типа и характерных размеров неоднородностей), однако накопленной на сегодняшний день информации недостаточно для количественного описания этой связи.

Влияние плотности ВВ на длину зоны реакции исследовано в работе [46] для ТНТ, гексогена, флегматизированного тэна и ТГ 36/64. Относительно низкое временное разрешение использованного электромагнитного метода ( $\approx 0,1$  мкс) не позволило авторам работы [46] разрешить зону реакции плотных ВВ, имеющих скорость детонации  $\approx 8$  км/с, однако полученные ими значения длины зоны реакции для упомянутых ВВ хорошо согласуются с нашими результатами. В работе [46] отмечалось, что время реакции детонирующих ТНТ, гексогена и пороха НБ зависит только от давления детонации и практически не зависит от размера частиц ВВ или заполнения ВВ водой. Можно сделать еще более общее заключение. На рис. 18 представлена обобщенная по нашим данным (см. табл. 1) и результатам работы [46] зависимость времени реакции от давления Жу́ге для ТНТ, гексогена, тэна, октогена, тетрила, дины и составов на их основе, аппроксимируемая выражением

$$t_J = 0,7 \exp(-p_J/14),$$

где  $p_J$  выражено в ГПа, а  $t_J$  — в мкс. Среднеквадратическое отклонение точек данной зависимости составило 20 %, что примерно равно экспериментальной погрешности.

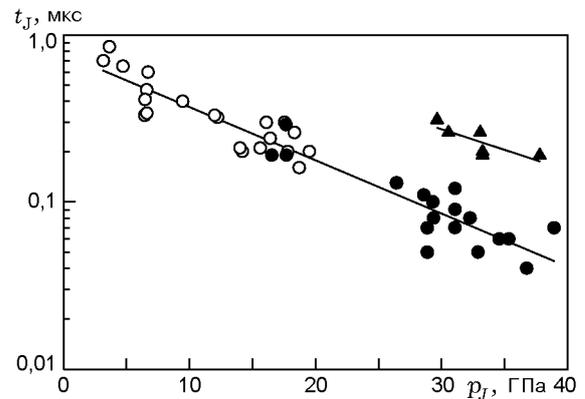


Рис. 18. Обобщенная зависимость времени реакции от давления Жу́ге:

● — данные авторов, ○ — данные работы [46], ▲ — выпадающие из обобщенной зависимости данные для стационарных и пересжатых детонационных волн в ТАТБ и ТАТБ/инерт, обработывавшиеся отдельно

Несмотря на то, что зависимость времени реакции от давления для стационарных и пересжатых детонационных волн в ТАТБ и ТАТБ/инерт отличается от обобщенной зависимости, она имеет практически тот же наклон. Это свидетельствует о том, что при увеличении давления в конце зоны реакции на 10 ГПа ширина зоны реакции уменьшается примерно в два раза независимо от того, вызвано ли это увеличением плотности, изменением состава или пересжатием. Сам факт уменьшения времени реакции с повышением давления качественно понятен (рост амплитуды ударной волны, ведущей детонацию, и температуры ВВ на фронте несомненно способствует повышению скорости реакции), однако существование единой зависимости для столь непохожих друг на друга ВВ, как, например, ТНТ и октоген, а также причины выпадения из нее ТАТБ и ТАТБ/инерт еще ждут своего объяснения.

Интересен вопрос о влиянии длины и диаметра заряда на длину зоны реакции. К настоящему времени опубликовано лишь несколько работ, в которых теоретически рассмотрено влияние размеров заряда ВВ на параметры зоны реакции. Влияние длины заряда ВВ на параметры зоны реакции было теоретически исследовано в одномерной постановке для ТНТ [50]. Было показано, что с увеличением длины заряда с 1 мм до 10 и 40 мм длина зоны реакции увеличивалась соответственно с 0,6 мм до 1 и 1,6 мм (примерно в два раза). При этом одно-

временно увеличивалось количество прореагировавшего в зоне реакции ВВ, а также скорость детонации и давление в плоскости Жуге.

Влияние диаметра заряда ВВ на длину зоны реакции особенно заметно для ВВ на основе ТАТБ, имеющих критический диаметр  $\approx 15$  мм, что примерно на порядок больше, чем, к примеру, у ВВ на основе октогена или гексогена, и сопоставимо с диаметром исследуемых нами зарядов (40, 60 и 120 мм). Влияние диаметра заряда ВВ на длину зоны реакции было теоретически исследовано в работе [51] для ВВ на основе ТАТБ. С использованием теории Вуда — Кирквуда [52], экспериментальных параметров Жуге, а также зависимостей скорости детонации и кривизны детонационного фронта от диаметра заряда было показано, что с увеличением диаметра заряда от 20 до 120 мм длина зоны реакции возрастает от 0,8 до 1,2 мм.

В работе [53] влияние диаметра заряда на длину зоны реакции ВВ EDC 35, содержащего 95 % ТАТБ и 5 % Kel-F, исследовалось численно в двухмерной постановке. В расчетах использовался закон реакции типа Forest Fire [54], воспроизводящий, в отличие от большинства других, экспериментальную зависимость скорости детонации от диаметра заряда ВВ. Согласно данным [53] с увеличением диаметра заряда от 20 до 120 мм длина зоны реакции возрастает от 0,6 до 1,0 мм. Вышесказанное хорошо иллюстрирует табл. 1. Увеличение диаметра заряда из ТАТБ от 40 до 60 мм привело к увеличению времени реакции с 0,24 до 0,31 мкс, а увеличение диаметра заряда состава ТАТБ/инерт от 60 до 120 мм увеличивает время реакции с 0,21 до 0,26 мкс.

Смысл данного рассмотрения в том, чтобы показать непостоянство размеров зоны реакции. Подобно скорости детонации и другим газодинамическим характеристикам ВВ, размеры зоны реакции изменяются как по мере распространения детонации вглубь заряда ВВ, так и при изменении диаметра достаточно длинного заряда ВВ. Как это ни парадоксально, связано это не с изменением скорости реакции, а с критерием определения границы зоны реакции. Скорость реакции определяется параметрами фронта и, вслед за скоростью детонации, несколько увеличивается по мере распространения детонации вглубь заряда ВВ. Однако, гораздо большее значение имеет тот факт, что граница зоны реакции определяется не количеством прореагировавшего ВВ, а условием Жуге.

Это приводит к тому, что длина зоны реакции увеличивается по мере распространения детонации, вследствие чего количество прореагировавшего ВВ в плоскости Жуге, скорость детонации и давление Жуге также увеличиваются. Непостоянство размеров зоны реакции, однако, также не следует преувеличивать. Диаметр и длина используемых на практике зарядов, как правило, не отличаются от некоего среднего значения  $\approx 80$  мм более чем в три раза, и, соответственно, длина зоны реакции отличается от среднего значения всего на  $20 \div 30$  %, что сравнимо с погрешностью измерений.

Сравнение полученных данных по размерам зоны реакции с результатами измерений, имеющимися в литературе, приведено в табл. 6. Размеры зоны реакции, приведенные в скобках, соответствуют  $\tau$  (это так называемая стадия быстрой реакции, при которой разлагается  $\approx 60$  % ВВ). Методы исследования обозначены следующим образом: ЛИ — лазерный интерферометр; ЛИВС — лазерный измеритель волновых скоростей; МВП — метод вспышкающих промежутков; ОТК — метод откола; ФЭ — фотоэлектрический метод; ЭМД — электромагнитный датчик. Из анализа табл. 6 видно, что данные авторов достаточно хорошо согласуются с основной массой имеющихся в литературе данных. В то же самое время, размеры зоны реакции по данным работ [4, 10] в несколько раз уже, что не может быть объяснено исключительно погрешностями эксперимента. Вероятно, основной причиной расхождения является различие способов определения размеров зоны реакции, которые, в свою очередь, являются следствием нижеприведенных упрощенных представлений о зоне реакции плоской детонационной волны [1–4]:

- реакция завершается в плоскости Жуге;
- параметры (в том числе длина) зоны реакции постоянны и не зависят от размеров заряда;
- параметры Жуге постоянны и не зависят от размеров заряда;
- на профиле массовой скорости в плоскости Жуге имеется излом;
- за плоскостью Жуге детонационная волна автомоделльна.

Таблица 6

## Размеры зоны реакции детонирующих ВВ

ВВ	Метод	$t_J$ , мкс	$X_J$ , мм	Источник
ТНТ литой	ЭМД	0,26 ÷ 0,30	1,23 ÷ 1,43	[46]
	ФЭ	0,218	1,47	[22]
	— // —	0,29 ± 0,04 (0,080 ± 0,012)	1,36 ± 0,19 (0,38 ± 0,06)	Настоящая работа
ТНТ прессованный с подплавлением	ФЭ	0,33 ± 0,09 (0,091 ± 0,014)	1,54 ± 0,22 (0,42 ± 0,07)	Настоящая работа
ТНТ прессованный	ЭМД	0,20	0,97	[46]
	ФЭ	0,09	0,63	[22]
	ЛИВС	0,14	—	[13]
	— // —	—	1,4	[14]
	МВП	—	0,62	[12]
	ЛИ	0,15	—	[41]
	— // —	0,08	0,55	[55]
	ОТК	—	0,3	[10]
	ФЭ	0,19 ± 0,04 (0,062 ± 0,013)	0,87 ± 0,17 (0,28 ± 0,06)	Настоящая работа
Гексоген	ЛИ	0,080 ± 0,005	—	[21]
	ФЭ	0,07 ± 0,01 (0,015 ± 0,003)	0,36 ± 0,07 (0,08 ± 0,02)	Настоящая работа
Гексоген/ТНТ 50/50	ФЭ	0,089	0,68	[22]
	ОТК	—	0,12	[10]
	ФЭ	0,13 ± 0,03 (0,033 ± 0,007)	0,64 ± 0,13 (0,16 ± 0,03)	Настоящая работа
Гексоген/ТНТ 64/36	ЭМД	0,1	0,6	[46]
	ОТК	—	0,13	[4]
	ФЭ	—	0,4	[5]
Гексоген/ТНТ 70/30	ФЭ	0,08 ± 0,02 (0,019 ± 0,004)	0,44 ± 0,09 (0,10 ± 0,02)	Настоящая работа
Гексоген/инерт 95/5	ЭМД	0,1	—	[23]
Гексоген/инерт 94/6	ФЭ	0,05 ± 0,01 (0,012 ± 0,002)	0,28 ± 0,04 (0,07 ± 0,01)	Настоящая работа
Тэн	ФЭ	0,08 ± 0,02 (0,032 ± 0,007)	0,42 ± 0,08 (0,17 ± 0,04)	Настоящая работа
Тэн/инерт 84/16	ЛИ	0,01 ÷ 0,02	—	[56]
Тэн/инерт	ЛИВС	0,04	—	[13]
Октоген	ФЭ	0,04 ± 0,01 (0,010 ± 0,002)	0,25 ± 0,04 (0,06 ± 0,01)	Настоящая работа
Октоген/инерт	ЛИВС	0,04	—	[13]
Октоген/инерт	МВП	—	0,25	[12]
Октоген/связка 94/6	ЛИ	0,015 ÷ 0,025	0,13 ÷ 0,25	[42]
	ЭМД	0,05	—	[23]
	ЛИ	0,02	—	[17]
	ФЭ	—	0,2	[5]

Таблица 6 (продолжение)

Размеры зоны реакции детонирующих ВВ

ВВ	Метод	$t_J$ , мкс	$X_J$ , мм	Источник
Октоген/связка 90/10	ЛИ	0,04	0,35	[56]
Октоген/ТНТ 90/10	ФЭ	$0,07 \pm 0,01$ ( $0,011 \pm 0,002$ )	$0,37 \pm 0,07$ ( $0,06 \pm 0,01$ )	Настоящая работа
Октоген/инерт	ФЭ	$0,06 \pm 0,01$ ( $0,011 \pm 0,002$ )	$0,36 \pm 0,05$ ( $0,06 \pm 0,01$ )	Настоящая работа
ТАТБ	ЭМД	$> 0,1$	—	[23]
	ЛИ	0,2	—	[16]
	ФЭ	$0,31 \pm 0,04$ ( $0,103 \pm 0,015$ )	$1,56 \pm 0,22$ ( $0,52 \pm 0,08$ )	Настоящая работа
ТАТБ/инерт	ЛИ	0,2	—	[16]
	— // —	$0,2 \div 0,3$	—	[18]
	— // —	$0,2 \div 0,3$	—	[41]
	— // —	0,28	2,1	[55]
	ФЭ	$0,26 \pm 0,05$ ( $0,099 \pm 0,021$ )	$1,24 \pm 0,25$ ( $0,47 \pm 0,10$ )	Настоящая работа

Современные данные свидетельствуют о том, что выделение энергии в детонационной волне затянато во времени и не завершается даже к плоскости Жуге. Естественно возникает вопрос, что считать зоной реакции. Некоторые исследователи определяют ее как зону, в которой выделяется основная доля энергии, оговариваясь, правда, что  $\approx 20\%$  энергии выделяется за пределами этой зоны [18 и др.]. Представляется более обоснованным называть зоной реакции зону от фронта до звуковой поверхности, где  $D = u_p + c$  (в одномерном случае это плоскость Жуге). Рассмотрим конкретные примеры.

В работе [4] зона реакции состава В исследовалась методом откола путем определения скорости свободной поверхности алюминиевой пластины, помещенной на заряд  $140 \times 140 \times 76$  мм, как функции ее толщины. Из рис. 19 видно, что несмотря на огромное число измерений (87 измерений в  $\approx 30$  опытах) отклонения точек от прямой не превышают погрешности эксперимента на уровне доверительной вероятности 95%. Единственным способом оценить длину зоны реакции в условиях, когда закон затухания неизвестен, являлась аппроксимация полученной зависимости двумя прямыми. Фактически это была аппроксимация двумя прямыми линиями экспоненциальной зависимости

$$W = W_1 + W_2 \exp(-l/l_0),$$

где  $l$  — толщина пластины,  $l_0$  — характерная толщина пластины,  $W_1$  и  $W_2$  — коэффициенты аппроксимации. Вполне естественно, что эти две прямые пересеклись в точке, примерно равной характерной толщине затухания  $l_0$ , соответствующей, в свою очередь, характерному времени реакции, а не полному времени реакции, в несколько раз большему. Таким образом,

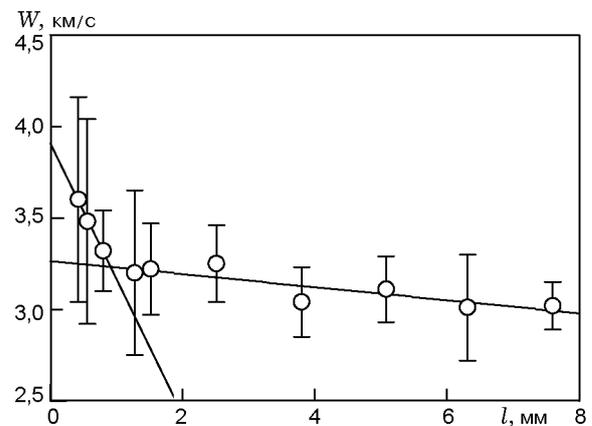


Рис. 19. Зависимость скорости свободной поверхности алюминиевой пластины, помещенной на заряд  $140 \times 140 \times 76$  мм состава В, от ее толщины [4]:

погрешности соответствуют уровню доверительной вероятности 95%

причиной отличия данных авторов от данных работы [4] явилось неверное представление авторов [4] о существовании на профиле массовой скорости в детонирующем ВВ излома, соответствующего точке Жуге.

В работе [10] зоны реакции прессованного ТНТ и состава ТГ 50/50 также исследовались путем определения закона затухания ударной волны в алюминиевой пластине, помещенной на заряд ВВ. Однако, учитывая, вероятно, опыт [4], авторы [10] выбрали иной способ определения длины зоны реакции. Представляя зону реакции как стационарную зону, параметры которой не зависят от размеров заряда, они определили верхний предел толщины пластины, до которого кривые затухания параметров ударной волны в пластине, полученные на зарядах длиной от 10 до 60 мм, совпадают. Это означало (принимая во внимание рассмотренную выше зависимость длины зоны реакции от длины заряда) нахождение самой узкой зоны реакции для всех исследованных зарядов (т. е. соответствующей 10-миллиметровому заряду), которая, как показали приведенные выше оценки и результаты расчетов [50], в 2–3 раза меньше длины зоны реакции для зарядов длиной 100 мм. С учетом этого замечания расхождения между данными авторов, полученными на зарядах длиной 100 мм ( $X_J = 0,64$  мм для ТГ 50/50 и  $X_J = 0,87$  мм для прессованного ТНТ), и данными [10], полученными на зарядах длиной 10 мм ( $X_J = 0,12$  мм для ТГ 50/50 и  $X_J = 0,3$  мм для прессованного ТНТ), вполне объяснимы. Таким образом, причиной отличия результатов авторов от данных работы [10] явилось неверное представление авторов [10] о постоянстве параметров (включая длину) зоны реакции независимо от размеров заряда ВВ и автоматичности детонационной волны за пределами этой стационарной зоны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был усовершенствован фотоэлектрический метод исследования структуры детонационных волн — разновидность метода преград, в которой параметры ударной волны в контактирующей с ВВ прозрачной индикаторной жидкости (хлороформе) непрерывно регистрируются по интенсивности излучения ее фронта. Использование более совершенной регистрирующей аппаратуры, а также модернизация экспериментального узла и методики обработки получаемых данных, приве-

ли к тому, что описанный вариант фотоэлектрического метода по чувствительности (0,2 % по массовой скорости границы ВВ/преграда) и временному разрешению (5 нс) находится на уровне лазерных интерферометров и может быть использован для исследования зон реакции детонирующих твердых ВВ, включая ВВ на основе октогена.

При помощи фотоэлектрического метода исследованы зоны реакции детонационных волн в ряде твердых ВВ. Во всех исследованных ВВ, за исключением агатированных, на детонационном фронте зарегистрирован пик давления (химпик). Параметры детонационного фронта согласуются с расчетом по экстраполированной ударной адиабате ВВ, что, тем не менее, не доказывает отсутствия реакции части ВВ непосредственно на фронте. На детонационном фронте реакция сразу идет с максимальной скоростью, уменьшающейся по мере ее завершения. Экспоненциальный вид профилей скорости границы ВВ/жидкость свидетельствует о первом порядке реакции, а отсутствие выраженной границы зоны реакции — о ее незавершенности в плоскости Жуге. Агатированные (прессованные в присутствии растворителя до пористости  $\approx 1$  % и полупрозрачного внешнего вида) гексоген и тэн имеют время реакции менее 5 нс (время разрешения методики). Это свидетельствует об определяющем влиянии гетерогенности ВВ на размеры зоны реакции. Мощные ВВ типа гексогена или тэна нагреваются в ударной волне, ведущей детонацию, до средней температуры более 1000 К, достаточной для их разложения менее чем за 5 нс. Однако гетерогенность ВВ приводит к образованию «холодных точек», в которых ВВ сжимается до давления химпика последовательностью слабых ударных волн и, имея вследствие этого более низкую температуру, реагирует со значительно меньшей скоростью. Процесс повышения температуры ВВ в этих «холодных точках» за счет теплообмена с окружающими горячими продуктами реакции с последующей реакцией и определяет время реакции  $\approx 0,1$  мкс.

Экспериментальное исследование пересжатых детонационных волн в ТАТБ и ТАТБ/инерт показало, что при пересжатии превышение давления на фронте над давлением в конце зоны реакции уменьшается и при давлении 40 ГПа совершенно исчезает, что, по видимому, отражает полную реакцию ВВ на фронте.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что влияние структуры ВВ (агатированное, прессованное, литое) на длину зоны реакции весьма заметно и связано, по всей вероятности, с изменением гетерогенности ВВ. Влияние плотности и состава ВВ на длину зоны реакции определяется, в основном, изменением давления Жуге: повышению давления Жуге на 10 ГПа соответствует уменьшение длины зоны реакции примерно в два раза, независимо от того, вызвано ли это изменением состава или плотности ВВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Зельдович Я. Б.** Теория распространения детонации в газовых системах // Журн. эксперим. и теор. физики. 1940. № 10. С. 542.
2. **Von Neumann J.** Theory of Detonation Waves // Office of Science Research and Development. Report N 549. 1942.
3. **Doering W.** Uber den detonations vorgang in gasen // Ann. Phys. 1943. V. 43, N 6. P. 421–436.
4. **Duff R. E., Houston E.** Measurement of Chapman-Jouguet pressure and reaction zone length in a detonating high explosive // J. Chem. Phys. 1955. V. 23, N 7. P. 1268.
5. **Mader C. L., Kershner J.** The heterogeneous explosive reaction zone // Proc. of the 9th Symp. (Intern.) on Detonation, Portland, Oregon, August 28–September 1, 1989.
6. **Дремин А. Н., Похил П. Ф.** Параметры детонационной волны тротила, гексогена, нитроглицерина и нитрометана // Докл. АН СССР. 1959. № 5. С. 128.
7. **Дремин А. Н., Похил П. Ф.** Исследование зоны химической реакции тротила // Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 11.
8. **Дремин А. Н., Шведов К. К.** Определение давления Чепмена — Жуге и времени реакций в детонационной волне мощных ВВ // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1964. № 2.
9. **Craig V. G.** Measurements of the detonation front structure in condensed-phase explosives // Proc. of the Tenth Symp. (Intern.) on Combustion. Cambridge, England, 1964. P. 863–867.
10. **Зубарев В. Н., Панов Н. В., Телегин Г. С.** О ширине стационарной зоны в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 1. С. 107–112.
11. **Альтшулер Л. В., Ашаев В. К., Балалаев В. В. и др.** Параметры и режимы детонации конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 153–159.
12. **Ашаев В. К., Доронин Г. С., Жученко В. С.** К вопросу о стационарной детонации зарядов конечной длины // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 1. С. 127–130.
13. **Ашаев В. К., Левин А. Д., Миронов О. Н.** Оптический метод измерения параметров ударных волн // Письма в ЖТФ. 26 августа 1980. Т. 6, вып. 16. С. 1005–1009.
14. **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.
15. **Гатиллов Л. А., Ибрагимов Р. А., Кудашов А. В.** О структуре детонационной волны в литом ТНТ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 82–99.
16. **Seitz W. L., Stacy H. L., Wackerle J.** Detonation reaction zone studies on TATB explosives // Eight Symp. (Intern.) on Detonation. Albuquerque, USA, 1985. V. 3, P. 999–1008.
17. **Steinberg D., Chau H.** A new approach for studying the expansion of detonation products // Ibid. P. 1009–1012.
18. **Erskine J., Green L., Tarver C. M.** VIZAR wave profile measurements in supra-compressed HE // Shock Compression of Condensed Matter-1989 / S. C. Schmidt, J. N. Johnson, L. W. Davison (Eds). Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. B. V., 1990. P. 717–720.
19. **Уткин А. В., Канель Г. И.** Исследование кинетики разложения тротила и флегматизированного гексогена в ударных и детонационных волнах // Детонация и ударные волны: Материалы 8-го Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву, Ташкент, 13–17 сентября 1986. Черноголовка, 1986. С. 50–52.
20. **Уткин А. В., Канель Г. И., Фортвов В. Е.** Эмпирическая макрокинетика разложения флегматизированного гексогена в ударных и детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 115–122.
21. **Уткин А. В., Маляренко С. И., Канель Г. И.** Закономерности разложения гексогена в ударных и детонационных волнах // Детонация: Материалы 9-го Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву, Суздаль, 19–24 ноября 1989. Черноголовка, 1989. С. 91–94.
22. **Воскобойников И. М., Гогоуля М. Ф.** Свечение ударного фронта в жидкости вблизи границы с детонирующим зарядом // Хим. физика. 1984. Т. 3, № 7.
23. **Hayes W., Tarver C. M.** Interpolation of detonation parameters from experimental particle velocity records // Proc. of the 7th Intern. Symp. on Detonation, Naval Surface Weapons Center, White Oak, Silver Spring, MD, 1981. P. 1029–1039.
24. **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.

25. Любятинский С. Н., Воробей В. А. Исследование структуры фронта детонационных волн в конденсированных ВВ фотоэлектрическим методом // 5 Всесоюз. совещание по детонации, Красноярск, 5–12 августа 1991. Т. 2. С. 369–373.
26. Lubyatinsky S. N., Vorobey V. A. Study of detonation front structure in high explosives using a photoelectric technique // Proc. of the 2nd Intern. Symp. on Intense Loading and its Effects, Chengdu, China, 1992.
27. Любятинский С. Н., Лобойко Б. Г. Исследование структуры зоны химических реакций в детонирующих ВВ фотоэлектрическим методом // Симпоз. по технологии энергетических материалов, Плезантон, Калифорния, 18–26 мая 1994.
28. Lubyatinsky S. N., Loboiko B. G. Reaction zone measurements in detonating aluminized explosives // Proc. of the 1995 APS Topical Conf. on Shock Compression of Condensed Matter, Seattle, Washington, USA, August 13–18, 1995. P. 779–782.
29. Lubyatinsky S. N., Loboiko B. G. Density effect on detonation reaction zone length in solid explosives // Proc. of the 1997 APS Topical Conf. on Shock Compression of Condensed Matter, Amherst, Massachusetts, USA, July 27–August 1, 1997.
30. Lubyatinsky S. N., Loboiko B. G. Detonation reaction zones of solid explosives // Proc. of the 12th (Intern.) Detonation Symp. Snowmass, Colorado, USA, 1998.
31. Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю. Индикаторный метод исследования ударных и детонационных волн // Хим. физика. 1994. Т. 13, № 12. С. 118–127.
32. Gibson F. C., Bowser M. L., Summers C. R. et al. Use of an electro-optical method to determine detonation temperatures in high explosives // J. Appl. Phys. 1958. V. 29. P. 628–632.
33. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф., Воскобойникова Н. Ф., Гельфанд Б. Е. Возможная схема описания ударноволнового сжатия пористых образцов // Докл. АН СССР. 1977. Т. 236, № 1. С. 75–78.
34. Воскобойников И. М., Богомолов В. М., Афанасенков А. Н., Шевелев В. Н. Определение температур органических веществ в ударных волнах // Докл. АН СССР. 1968. Т. 182. С. 807–810.
35. Compendium of Shock Wave Data / M. Van Thiel, A. S. Kusubov, A. C. Mitchell (Eds). Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, 1977.
36. LASL Shock Hugoniot Data. Berkeley–Los Angeles–London: Univ. of California Press, 1980.
37. LASL Explosive Property Data / T. R. Gibbs, A. Popolato (Eds). Berkeley–Los Angeles–London: Univ. of California Press, 1980.
38. Илюхин В. С., Похил П. Ф., Розанов О. К., Шведова Н. С. Измерение ударных адиабат литого тротила, кристаллического гексогена и нитрометана // Докл. АН СССР. 1960. Вып. 131. С. 793.
39. Шорохов Е. В., Литвинов Б. В. Ударная сжимаемость взрывных композиций на основе ТАТБ в диапазоне давлений от 0,1 до 40 ГПа // Хим. физика. 1993. Т. 12, № 5. С. 722–723.
40. Tarver C. M., Fried L. E., Ruggiero A. J., Calef D. F. Energy transfer in solid explosives // Proc. of the Tenth Intern. Detonation Symp., Boston, Massachusetts, July 12–16, 1993. P. 3–10.
41. Green L. G., Tarver C. M., Erskine D. J. Reaction zone structure in supracompressed detonating explosives // Proc. of the 9th Symp. (Intern.) on Detonation, Portland, Oregon, August 27–September 1, 1989.
42. Gustavsen R. L., Sheffield S. A., Alkon R. R. Detonation wave profiles in HMX based explosives // Proc. of the 1997 Topical Conf. on Shock Compression of Condensed Matter, Amherst, Massachusetts, USA, July 27–August 1, 1997.
43. Tarver C. M., Chidester S. K., Nichols A. L. Critical conditions for impact- and shock-induced hot spots in solid explosives // J. Phys. Chem. 1996. V. 100, N 14. P. 5794–5799.
44. Дремин А. Н. О реализации химических изменений молекулярных конденсированных ВВ в процессе их сжатия в ударном фронте детонационной волны // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 9. С. 113–118.
45. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids. 1980. V. 23, № 12. P. 2362–2372.
46. Детонационные волны в конденсированных средах / А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. М.: Наука, 1970.
47. Kury J. W., Breithaupt R. D., Kury J. W. Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 7193.
48. Kineke J. N., West C. E. Shocked states of four overdriven explosives / Proc. of the 5th Symp. (Intern.) on Detonation. Pasadena, 1970. P. 394–402.
49. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. М.: Мир, 1985.
50. Бахрах С. М., Евстигнеев А. А., Зубарев В. Н., Шанин А. А. Влияние конечной скорости разложения ВВ на определение детонационных параметров // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 6. С. 117–121.
51. Swift D. C., Lambourn B. D. A Review of developments in the W-B-L detonation model // Proc. of the Tenth Intern. Detonation Symp., Boston, Massachusetts, July 12–16, 1993. P. 386–393.

52. **Wood W. W., Kirkwood J. G.** Diameter effects in condensed explosives. The relation between velocity and radius of curvature of the detonation wave // J. Chem. Phys. 1954. V. 22. P. 1920.
53. **Campbell A. W., Engelke R.** The diameter effect in high-density heterogeneous explosives // Proc. of the Sixth Symp. (Intern.) on Detonation, San Diego, California, August 24–27, 1976. P. 161–171.
54. **Johnson J. N., Tang P. K., Forest C. A.** Shock-wave initiation of heterogeneous reactive solids // J. Appl. Phys. 1985. V. 57, № 9. P. 4323–4334.
55. **Sheffield S. A., Bloomquist D. D., Tarver C. M.** Subnanosecond measurements of detonation fronts in solid high explosives // J. Chem. Phys. 1984. V. 80, № 8. P. 3831–3844.
56. **Fedorov A. V., Menshikh A. V., Yagodin N. B.** On detonation wave front structure of condensed high explosive // Proc. of the 1997 Topical Conf. on Shock Compression of Condensed Matter, Amherst, Massachusetts, USA, July 27–August 1, 1997.

*Поступила в редакцию 31/V 2000 г.*

---