

13. Л. М. Биберман, И. Т. Якубов. ЖТФ, 1963, 33, 11, 1344.
14. Б. С. Пункевич. Измерительная техника, 1974, 1.
15. Г. Б. Двайт. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М., «Наука», 1973.
16. E. L. Resler, S. C. Lin, A. Kantrowitz. J. Appl. Phys., 1952, 23, 12, 1390.
17. S. C. Lin, E. L. Resler, A. Kantrowitz. J. Appl. Phys., 1955, 26, 95.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ НАПОЛНИТЕЛЯ НА РАЗЛОЖЕНИЕ НАПОЛНЕННЫХ СИСТЕМ ТРОТИЛА И ГЕКСОГЕНА В УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

К. К. Шведов, А. Л. Кривченко, В. Н. Сальников

(Черноголовка)

Одним из факторов, обуславливающих возникновение разложения в наполненных системах, может быть разогрев наполнителя и поджигание им частиц ВВ. В данной работе сделана попытка выявить влияние этого фактора на разложение наполненных зарядов тротила и гексогена при различных давлениях. В основном использовались два сильно отличающихся по температуре ударного разогрева наполнителя — вода и CCl_4 , некоторые опыты проведены с ацетоном и бромформом. В первой серии экспериментов получены данные по торможению границы раздела парафин — исследуемое ВВ в широком диапазоне давлений ударной волны. Постановка опыта аналогична работам [1, 2]. Во второй серии экспериментов определялась зависимость детонационных характеристик этих же систем от диаметра заряда. Использовался гранулированный тротил размером зерна 2—3 мм и плотностью 1,54—1,57 г/см³ и кристаллический гексоген размером частиц 0,3—0,5 мм и плотностью 1,8 г/см³. Заряды готовились заливкой наполнителя в пористые заряды из указанных ВВ. Средняя плотность систем тротила с водой и четыреххлористым углеродом составляла 1,32 и 1,58 г/см³, а для гексогена — 1,43 и 1,7 г/см³ соответственно.

На рис. 1 приведены экспериментальные кривые торможения границы раздела парафин — наполненные заряды тротила и гексогена. Видно, что для всех исследованных систем при давлении выше некоторого p^* на кривых торможения имеется резкий излом за время 0,5—0,7 мкс. Для взрывчатых систем гранулолога p^* не зависит от природы наполнителя и составляет приблизительно 110 кбар и слабо зависит ($\sim 200 \div 220$ кбар) для гексогена. Наличие резкого излома кривой торможения можно связывать, как показано в работе [2], с полным разложением ВВ за времена, близкие ко времени излома кривой торможения. Слабый наклон кривых торможения в области $p < p^*$ означает, что разложение ВВ также имеет место, но протекает менее интенсивно и не заканчивается за время наблюдения.

Разложение наполненных систем может быть обусловлено различными причинами. Для анализа их рассмотрим данные по зависимости температуры ударного разогрева от давления в использованных ВВ и наполнителях. Они приведены на рис. 2. Данные для тротила ($\rho_0 = 1,54$ г/см³) и монокристаллического гексогена заимствованы из [3, 4], а для наполнителей рассчитывались по [5]. В расчетах предполагалось аддитивное распределение энергии между компонентами смеси. Несмотря на известные неточности в расчетах температуры ударного разогрева, относительное положение кривых $T-p$ определено достаточно надежно. При давлении ~ 110 кбар, когда появляется излом

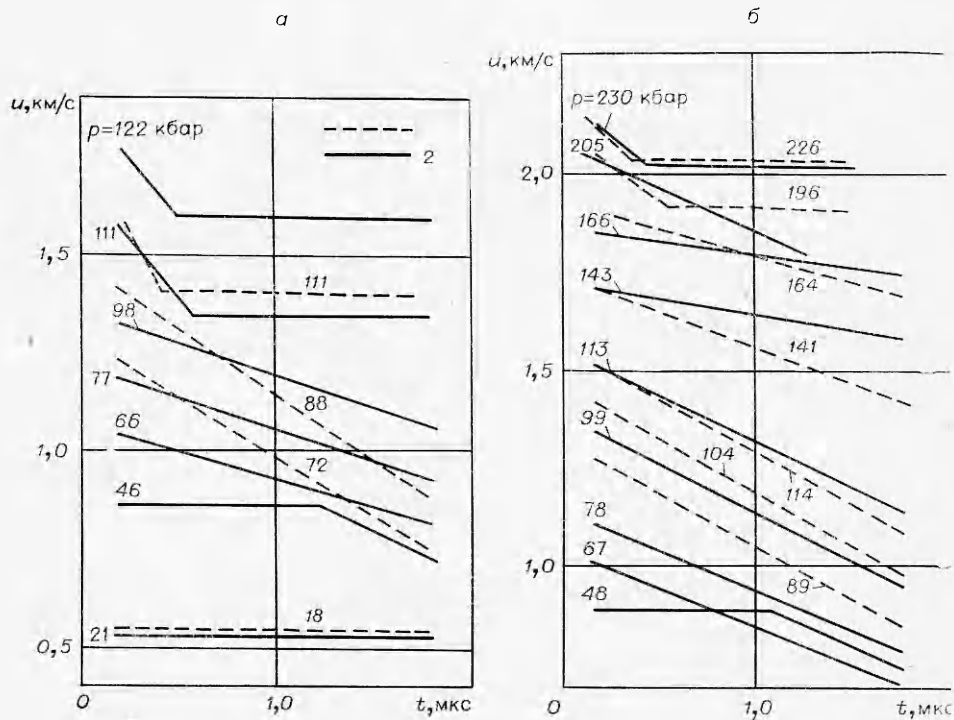


Рис. 1. Кривые торможения границы раздела зарядов тротила (а) и гексогена (б) с различными наполнителями.

1 — вода; 2 — четыреххлористый углерод.

на кривых торможения гранулозола с водой и CCl_4 , температура ударного разогрева воды составляет ≈ 1000 К и приблизительно на 650 К ниже, чем у CCl_4 , а различие в тепловых потоках будет еще больше. Но это не сказывается на разложении наполненных зарядов гранулозола. Отсюда можно заключить, что возможное поджигание зерен ВВ за счет разогрева наполнителя — не основная причина его разложения при $p \geq p^*$. Поскольку зерна гранулозола поликристаллические, они сами содержат внутри много дефектов, являющихся очагами реакции. Благодаря их большой концентрации разложение при $p \geq p^*$ приближается к гомогенному взрыву.

Возможность локальных разогревов за счет имеющих начальных дефектов внутри частиц ВВ гораздо меньше для наполненных систем гексогена, частицы которого имеют плотность, равную плотности монокристалла. Поэтому можно было ожидать значительное увеличение роли поджигания зерен ВВ с поверхности за счет наполнителя. Количест-

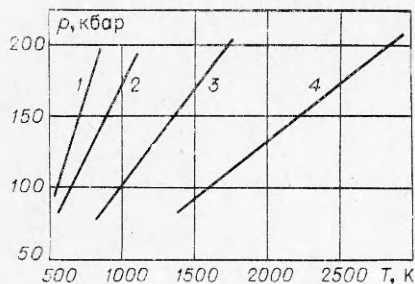


Рис. 2. Зависимость температуры ударного разогрева от давления в монокристаллическом гексогене (1), тротиле плотностью $1,54 \text{ г/см}^3$ (2), воде (3) и четыреххлористом углероде (4).

венные оценки влияния природы наполнителя на возможность зажигания ВВ в наполненных системах дает теория зажигания [6]. Расчеты по этой теории с использованием температур ударного разогрева из рис. 2 и теплофизических констант ВВ и наполнителей, полученных в нормальных условиях [7], дали следующий результат. Для системы гексоген — CCl_4 задержка зажигания при $p=100$ кбар составила 10^{-5} с, при $p=150$ кбар — $10^{-7} \div 10^{-8}$ с, при $p=200$ кбар — $10^{-10} \div 10^{-11}$ с. Задержка зажигания в системах гексоген — вода при тех же давлениях на 1—2 порядка выше.

Таким образом, в принципе поджигание частиц ВВ за счет наполнителя не исключается. Однако из-за малой глубины прогрева и относительно небольшой поверхности общая нагретая масса ВВ, по-видимому, невелика. Оценки показывают, что при размере частиц 0,5 мм и времени прогрева 0,5 мкс прогретая масса составляет несколько процентов от общей массы ВВ в единице объема. Два наполнителя — вода и CCl_4 , отличающиеся по температурам ударного разогрева при давлении 200 кбар приблизительно на 1000 К, должны приводить к отличию во временах, задержки зажигания на 1—2 порядка. Экспериментальные же времена торможения границы раздела практически не отличаются. Опытные данные по критическому давлению инициирования, приведенные в работе [8] для гексогена с водой и четыреххлористым углеродом, также близки. Следовательно, появление излома на кривых торможения при $p=200$ —220 кбар в наполненных системах гексогена связано с сильным разогревом самого ВВ в ударной волне и его быстрым разложением. Это согласуется с работой [4], в которой делается вывод о разложении монокристаллического гексогена путем адиабатического теплового взрыва при давлениях ударных волн 170—195 кбар за времена ≤ 1 мкс.

Из расчетов следует, что в области низких давлений ($p \leq 100$ кбар) задержки зажигания на 1—2 порядка больше характерных времен наблюдения (2—4 мкс). Поэтому за время наблюдения не должно быть разложения ВВ за счет поджигания наполнителем. Однако, как видно из рис. 1, б, оно наблюдается. Таким образом, и в области низких давлений основная причина разложения наполненных ВВ состоит, по-видимому, в разогреве частиц самого ВВ в отдельных очагах.

Наполнитель может влиять на инициирование разложения ВВ другими путями, приводя к созданию, например, микроочагов с повышенными давлением и температурой в начальный момент ударного сжатия из-за различия в жесткостях, неаддитивному распределению энергии в результате межфазного взаимодействия и т. п. Эти эффекты трудно выделить. Эксперименты с сильно отличающимся по жесткости наполнителем (бромформом) не показали излома на кривых торможения до давлений 260 кбар, что можно объяснить снижением температурного ударного разогрева ВВ из-за возможного неаддитивного распределения энергии. Как следует из работ [9, 10], перераспределение энергии в сложной системе осуществляется в сторону компонента, удельный объем которого в ударно-сжатом состоянии меньше.

Качественное изменение разложения ВВ вблизи p^* , обнаруживаемое в опытах по торможению, может проявиться и в стационарных режимах детонации. Для обнаружения этого в тех же системах определены параметры детонации в зависимости от диаметра заряда. В таблице приведены диаметры зарядов (d), скорость детонации (D), массовая скорость в точке Жуге (u), давление (p), показатель политропы продуктов (n) и время реакции (τ). Данные являются средними из 3—5 опытов. Для водонаполненных систем гранулозола при диаметрах заряда ниже предельных наблюдается плавный спад параметров D , u , p , показатель политропы продуктов растет, как и для индивидуальных ВВ. Критическое давление детонации составляет ~ 70 кбар, что соответству-

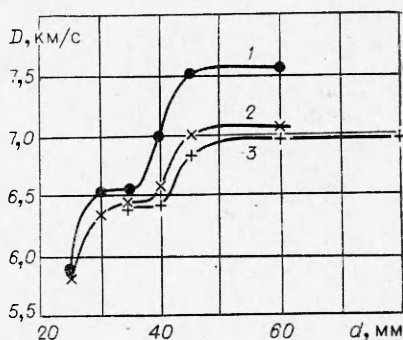
Взрывчатые системы	d , мм	D , км/с	u , км/с	p , кбар	n	τ , мкс
Гранулотол (зерно 2—3 мм) — вода, $\rho_0 = 1,34$ г/см ³	15	Затухание детонации				
	17,5*	5,4	1,0	71	4,3	—
	20	5,5	—	—	—	—
	25	5,84	1,10	85	4,35	0,45
	30	5,88	1,13	92	4,0	0,5
	40	5,90	1,19	93	4,0	0,6
	60	6,05	1,31	107	3,6	0,6
	80	5,90	1,33	106	3,4	0,7
Гексоген—ацетон, $\rho_0 = 1,35$ г/см ³	18*	—	—	—	—	—
	35	6,43	1,25	109	4,15	0,4
	40	6,43	1,25	109	4,15	0,45
	45	6,80	1,60	147	3,25	0,45
	60	6,92	1,62	153	3,30	0,5
	80	6,98	1,62	153	3,30	0,5
Гексоген — вода, $\rho_0 = 1,43$ г/см ³	22*	5,1	—	—	—	—
	25	5,9	1,17	100	4,05	0,5
	30	6,58	1,17	114	4,65	0,6
	35	6,58	1,17	114	4,65	0,6
	40	6,96	1,30	129	4,35	0,5
	45	7,58	1,54	167	4,10	0,5
	60	7,60	1,60	177	3,75	0,45
Гексоген — ССl ₄ , $\rho_0 = 1,7$ г/см ³	19*	5,1	—	—	—	—
	25	5,8	1,17	115	4,00	0,5
	30	6,37	1,17	126	4,45	0,5
	35	6,44	1,17	128	4,50	0,6
	40	6,58	1,52	170	4,35	0,5
	45	7,02	1,62	193	4,30	0,5
	60	7,05	1,75	210	3,0	0,7

* d
кп

ет давлению на ударном фронте приблизительно 105 кбар ($p_{\phi} \approx 1,5 p$). Это давление близко к давлению, при котором появляется резкий излом на кривых торможения ($p^* = 110$ кбар). В работе [2] показано, что подобный излом на кривых торможения вблизи p^* наблюдается и в жидком тротиле. Таким образом, процессам детонации наполненных зарядов гранулотола соответствует область $p \geq p^*$ и единый механизм разложения, близкий к гомогенному взрыву как и для жидкого состояния ВВ.

Для наполненных систем гексогена зависимость параметров детонации от диаметра заряда имеет плато в некотором диапазоне диаметров заряда. Для примера на рис. 3 приведены зависимости скорости детонации от диаметра заряда в исследованных системах. Участки с постоянными параметрами в узком интервале диаметров заряда наблюдались ранее для смесевых ВВ и систем гексоген — парафин [11, 12]. Соответствующие им параметры названы псевдоидеальными, а наличие их связывалось со сменой механизма разложения ВВ. Давления на ударном фронте, при которых имеет место плато, составляют в экспериментах приблизительно 170—220 кбар. Эти давления близки и несколько ниже давлений, при которых происходит качественное изменение кривых торможения. Поэтому смена механизма может происходить несколько раньше появления участка постоянных параметров на зависимости $D(d)$ или в самом его начале на верхней ветви.

Рис. 3. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда в наполненных системах гексогена с водой (1), четыреххлористым углеродом (2) и ацетоном (3).



Как видно из рис. 3, качественно зависимости $D(d)$ для различных наполнителей подобны, и близки давления, при которых наблюдается плато. Это указывает на то, что поджигание ВВ за счет разогрева наполнителя, как и в опытах по торможению, не оказывает существенного влияния на разложение ВВ. Изменение механизма разложения, как и в опытах с тротилом, состоит в переходе от близкого к гомогенному взрыву (участок выше плато на зависимости $D(d)$), к очаговому механизму разложения (область плато и ниже).

Таким образом, из полученных данных следует, что разложение наполненных систем в ударных и детонационных волнах определяется в основном характером и степенью нагрева самого ВВ. Поджигание частиц ВВ наполнителем не играет существенной роли. Возможно, оно будет существенно в системах, где полностью исключены дефекты внутри и по границам частиц.

Поступила в редакцию
12/VIII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Шведов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. К. К. Шведов, А. Н. Дремин.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1977.
3. К. К. Шведов, С. А. Колдунов.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
4. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников.— В сб.: Взрывное дело, № 68/25. М., «Недра», 1970.
5. И. М. Воскобойников, А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов. ФГВ, 1967, 3, 4.
6. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. Comb. and Flame, 1971, 16.
7. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
8. А. Н. Афанасенков, В. А. Даниленко. ФГВ, 1975, 11, 6.
9. В. И. Николаевский. ПМТФ, 1969, 3.
10. Г. А. Богачев. ПМТФ, 1973, 4.
11. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников, Г. С. Соснова. ПМТФ, 1963, 5.
12. А. Я. Апин, Г. В. Димза. Докл. АН СССР, 1970, 192.

К СТАЦИОНАРНОЙ ТЕОРИИ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА

Е. А. Еремин, А. К. Колесников

(Пермь)

В работе рассматривается обобщение известной задачи Д. А. Франк-Каменецкого о тепловом взрыве в среде, где протекает экзотермическая химическая реакция [1], на случай слоя с проницаемыми границами. Через одну из границ с постоянной скоростью осуществляется однородный вдув реагента, а через другую — отсасывание с такой же скоростью. Рассматривается бесконечный слой толщиной d , ограниченный проницаемыми плоскостями $z=0$; d и заполненный химически активной