

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ ГЕКСОГЕНА С ЖИДКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. Н. Афанасенков, В. А. Даниленко
(Москва)

1. В теории детонации весьма интересен вопрос о возбуждении и развитии детонации в смесевых (гетерогенных) взрывчатых веществах (ВВ) под действием ударных волн. Он имеет как практическое, поскольку смесевые ВВ широко используются в народном хозяйстве, так и теоретическое значение, например, для изучения условий установления механического и термодинамического равновесия в ударной волне в смесевом ВВ, кинетики протекания реакций между компонентами и т. п.

Однако, несмотря на большое число работ, посвященных изучению возбуждения детонации гетерогенных ВВ ударными волнами (обзор их можно найти в [1, 2]), эта проблема далека еще до своего завершения. Сложность состоит в том, что неизвестно, каким образом возникает быстрая реакция разложения ВВ, которая затем развивается в детонацию. Общепринято только, что она начинается в местах неоднородностей заряда ВВ («горячие точки»).

В работе [3] предложено, что реакция инициируется в точках контакта поверхностей кристаллов, где горячие точки образуются в результате трения. В работе [4] возникновение реакции связано с адиабатическим разогревом воздушных включений, контактирующих с зернами ВВ. Оценки температуры и времени поджигания зерна, выполненные в работе [5], допускают такую возможность. Подробно этот механизм обсуждается в [6]. Последующие работы [7, 8] поставили этот механизм под сомнение. При рассмотрении методов инициирования детонации гомогенных ВВ выяснилось [9], что поджигание кристалла ВВ сжатым воздухом (через теплопроводность) на практике не осуществляется. В [9] высказано предположение, что осколки (или пыль) вещества из поверхности полости могут попадать в горячий воздух и быстро нагреваться до температуры, достаточной для взрыва. Авторы работы [10] считают, что горячие точки и соответственно высокие температуры в веществе образуются при соударении осколков кристалла (при отколе) и струй продуктов взрыва со стенкой поры. В [11] предполагается, что горячие точки образуются в месте столкновения ударных волн непосредственно за неоднородностью, при этом материал неоднородности не играет никакой роли, а в [12] — вследствие образования микросдвигов и микроразрушений вблизи границы поры. В работах [13, 14] значительная роль в процессе инициирования детонации в неоднородных ВВ отводится дроблению зерен ВВ.

Обзор литературы выявил явную противоречивость влияния размеров пор или неоднородностей на минимальную величину давления ударной волны ($p_{кр}$), вызывающей детонацию заряда гетерогенного ВВ. В [11] показано, что таблетки из молотого ТНТ более чувствительны, чем из грубого ТНТ при постоянной плотности, потому, что чувствительность ВВ (т. е. величина $p_{кр}$) зависит от числа, а не от объема пустот. Авторы [15], наоборот, нашли, что ударно-волновая чувствительность низкоплотного тэна уменьшается с увеличением его удельной поверхности, а в работе [16] считается, что введение добавки в пористое ВВ приводит к уменьшению числа горячих точек и не приводит к перераспределению энергии в заряде. В работе [17] отмечается, что чувствительность смеси гексогена с парафином зависит не от числа

неоднородностей, а от того, какую часть поверхности зерен гексогена обволакивает парафин.

Ввиду отсутствия единой точки зрения на механизм инициирования детонации в гетерогенных (смесевых) ВВ и роль наполнителя в этом механизме в настоящей работе предпринята попытка выяснить, осуществляется ли механизм поджигания при инициировании детонации гетерогенных ВВ ударными волнами. Для этой цели исследовались смеси кристаллического гексогена с жидкими наполнителями: гексаном, водой и четыреххлористым углеродом. Предполагалось, что наполнитель в ударной волне будет разогреваться до большей температуры, чем гексоген, и поджигать его. Поскольку поджигание зависит от удельной поверхности ВВ, было изучено влияние дисперсности гексогена на величину $\rho_{кр}$.

2. Рассмотрим предварительно принципиальную возможность зажигания зерен гексогена наполнителем. Под зажиганием будем понимать нестационарный быстрый рост температуры с достижением максимума вблизи внешней поверхности зерна (т. е. нарушение стационарного распределения температуры на границе раздела ВВ — наполнитель).

Теория зажигания реакционноспособной полубесконечной системы впервые была разработана Я. Б. Зельдовичем [18] и в дальнейшем уточнена в ряде работ [19, 20]. В работах [5, 21] рассматривались задачи о кондуктивном поджигании конденсированных ВВ, занимающих полубесконечные плоскости.

Для проверки предположения о поджигании зерен ВВ наполнителем после прохождения ударной волны прямое перенесение результатов указанных выше работ не представляется возможным в силу следующих обстоятельств:

1) расстояние между поверхностями зерен ВВ (l) конечное; его можно рассчитать по формуле $l = \bar{d} \cdot (\rho_{кр}/\rho_0 - 1)^{1/2}$, предложенной в [22]. Здесь $\rho_{кр}$ — плотность монокристалла ВВ, ρ_0 — плотность смеси, \bar{d} — средний размер (диаметр) зерна;

2) размеры частиц ВВ таковы, что не выполняется критерий применимости теории Зельдовича

$$\left(\frac{Q}{\lambda} \frac{E}{RT_n^2} Z \exp[-E/RT_n] \right)^{-1/2} < \bar{d},$$

где λ — коэффициент теплопроводности; E и Z — параметры активации в уравнении Аррениуса; T_n — температура наполнителя; Q — теплота разложения ВВ; R — универсальная газовая постоянная;

3) реакция поджигания носит не однородный характер, она зависит от пространственного расположения массы компонент. Учитывая эти особенности, для выяснения принципиальной возможности поджигания зерен ВВ наполнителем исследуемые системы моделировались.

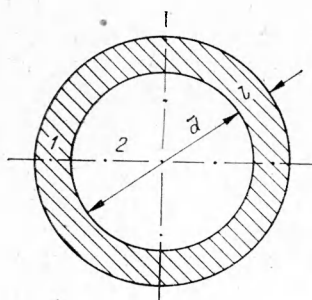


Рис. 1. Модель смеси гексогена с жидким наполнителем: 1 — гексоген; 2 — наполнитель.

Реальная смесь гексогена с наполнителем содержит некоторую фракцию зерен гексогена, размеры которых статистически колеблются около \bar{d} . Эта смесь была заменена модельной, в которой размер зерна постоянен и равен \bar{d} и зерно имеет сферическую форму. На поверхности зерна наполнитель располагается шаровым слоем толщиной порядка l (рис. 1). Реакция поджигания начинается на границе раздела зерно

ВВ — наполнитель и в дальнейшем процесс протекает по модели «взрывного горения» при постоянном давлении. Компоненты смеси однородны и изотропны. Для такой смеси решалась задача теплопроводности с граничным условием 4-го рода применительно к одному зерну. Находилось распределение температуры в зерне и оболочке из наполнителя, рассчитывалась величина критерия (δ_0) Франк-Каменецкого [23] и сравнивалась с критической

$$\delta_0 = \frac{E}{RT_n^2} \frac{Q}{\lambda} \bar{d}^2 Z \exp\left(-\frac{E}{RT_n}\right). \quad (1)$$

Условие зажигания, т. е. условие, когда стационарное распределение температуры в системе перестает быть возможным, согласно [23], есть $\delta_0 > \delta_{кр}$, а отсутствие зажигания (стационарное распределение температуры в системе) — $\delta_0 < \delta_{кр}$. Величина $\delta_{кр}$ для нестационарного распределения температуры при отсутствии тепловыделения без учета теплового сопротивления на границе раздела компонент, согласно [23], определяется выражением

$$\delta_{кр} = k_1^2 \bar{d}^2 / 1,08e, \quad (2)$$

где k_1 — наименьшее собственное число линейного уравнения теплопроводности, $e = 2,71828 \dots$. При наличии теплового сопротивления на границе раздела компонент $\delta_{кр}$ вычислялось по формуле, предложенной в работе [24], но оно оказалось меньше, чем вычисленное по (2).

Вычисленные по формулам (1), (2) значения δ_0 и $\delta_{кр}$ приведены в табл. 1. Видно, что $\delta_0 > \delta_{кр}$, а это указывает на возможность поджигания зерна гексогена окружающим наполнителем.

Анализ расчетных данных показывает, что с увеличением давления и толщины слоя наполнителя увеличивается δ_0 , при этом величина $\delta_{кр}$ практически не изменяется. Все это приводит к усилению неравенства $\delta_0 > \delta_{кр}$, т. е. к увеличению вероятности поджигания зерна гексогена слоем наполнителя при возрастании давления ударной волны.

3. В данной работе для определения $\rho_{кр}$ использовалась общепринятая схема постановки эксперимента: активный заряд — инертная преграда — заряд исследуемого ВВ (рис. 2). В качестве активного заряда применялись две шашки тротила или смеси ТНТ/NaCl диаметром 40 и высотой 30 мм. В качестве преграды использовались пластины из алюминия и меди толщиной $\delta = 5$ мм. Давление инициирующей ударной волны изменялось варьированием состава смеси ТНТ/NaCl при постоянной плотности $\rho_0 = 1,36$ г/см³ и изменением плотности тротила.

Для генерирования ударной волны с плоским фронтом применялась прессованная из ТГ 50/50 линза с конусообразной выемкой, в которую

Таблица 1
Вычисленные значения δ_0 и $\delta_{кр}$ для различных наполнителей

Т, К	Наполнитель						Размер зерна гексогена, $\bar{d} \cdot 10$, мм		
	H ₂ O		C ₆ H ₁₄		CCl ₄				
	$\delta_0 \cdot 10^{-3,5}$	$\delta_{кр} \cdot 10^2$	Т, К	$\delta_0 \cdot 10^{-2,5}$	$\delta_{кр} \cdot 10^2$	Т, К		$\delta_0 \cdot 10^{-5,5}$	$\delta_{кр} \cdot 10^2$
	по (1)	по (2)		по (1)	по (2)		по (1)	по (2)	
760	11,6	345	589	10,4	342	700	5,69	344	1,34 ÷ 1,78
830	68,2	347	658	206	344	801	48,0	347	1,87 ÷ 2,42
1050	394	352	880	2440	349	1200	142,0	363	3,06 ÷ 3,44
1150	730	358	950	267,0	350	1340	650	370	3,44 ÷ 4,85
1290	2100	370	1120	716	358	1670	3500	391	6 ÷ 10

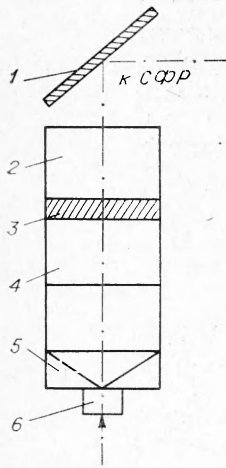


Рис. 2. Схема эксперимента.

1 — зеркало; 2 — исследуемая смесь; 3 — металлическая преграда; 4 — активный заряд; 5 — генератор плоской волны; 6 — детонатор.

помещался конус из медной фольги толщиной 0,3 мм. Иницирование осуществлялось капсюлем-детонатором через промежуточный детонатор (таблетка ТГ 50/50, $d=h=20$ мм). Исследуемая смесь гексогена с наполнителем помещалась в кювету из плексигласа или А1 диаметром 40 и высотой 60 мм. Дном кюветы являлась пластина-преграда.

В опытах использовался гексоген как заводского приготовления (получен со склада), так и перекристаллизованный из ацетона. В качестве наполнителей были выбраны вода, гексан и четыреххлористый углерод, которые сильно различаются по динамической сжимаемости и по теплофизическим свойствам. Порошок гексогена рассеивался на узкие фракции, средний размер которых (\bar{d}) рассчитывался по формуле Андерсена [25]:

$$\bar{d} = \sqrt[3]{2d_1^2d_2^2/d_1 + d_2},$$

где d_1 и d_2 — размеры отверстий сит, между которыми заключалась данная фракция.

Заряды приготавливались следующим образом. Для устранения мелких частиц ($\bar{d} < 1$ мк), прилипших к крупным, каждая фракция порошка гексогена

отмывалась в воде и затем высушивалась. Далее определенная порция порошка помещалась в кювету, заливалась водой и вакуумировалась. При достижении давления ~ 70 кПа наблюдалось вспенивание воды, причем выделяющиеся пузырьки воздуха захватывали с собой мельчайшие частицы гексогена. При давлении ~ 10 Па выделение воздуха из смеси прекращалось. После вакуумирования из кювет удалялся излишек воды и через 10—20 мин производился подрыв.

Вакуумировать смесь гексогена с гексаном и CCl_4 не имеет смысла, поскольку растворитель улетучивался. Поступали так. На дно двухлитрового цилиндра, заполненного растворителем, помещалась пустая кювета. Отвакуумированная кювета со смесью гексогена и воды вносилась в растворитель, переворачивалась и гексоген свободно падал в пустую кювету. По мере оседания зерна гексогена освобождались от окружающей их воды. Контрольные измерения плотности смесей гексогена с гексаном и CCl_4 показали, что содержание воды в них не превосходит 2%.

В опыте фиксировался взрыв исследуемой смеси или отсутствие его при заданных параметрах активного заряда. Регистрация явления производилась при помощи прибора СФР через зеркало, помещенное у торца заряда под углом 45° к его оси. Типичная фотограмма взрыва представлена на рис. 3. Давление в смеси рассчитывалось методом отражения на p, u -диаграмме. Оно соответствует точке пересечения изэнтропы преграды, выходящей из состояния, возникшего в ней при детонации активного заряда, и ударной адиабаты смеси. Ясно, что и состояние в преграде и ударная адиабата исследуемой смеси должны быть известны. Ударная адиабата двухкомпонентной непористой смеси рассчитывалась по смешевому методу [26—28] в предположении, что давление в компонентах на фронте ударной волны выравнивается ($p_{см} = p_1 = p_2$), а температура нет.

Из законов сохранения массы, импульса и энергии на ударном разрыве легко получить следующее выражение для массовой скорости смеси

$$u_{см}^2 = \alpha u_1^2 + (1 - \alpha) u_2^2, \quad (3)$$

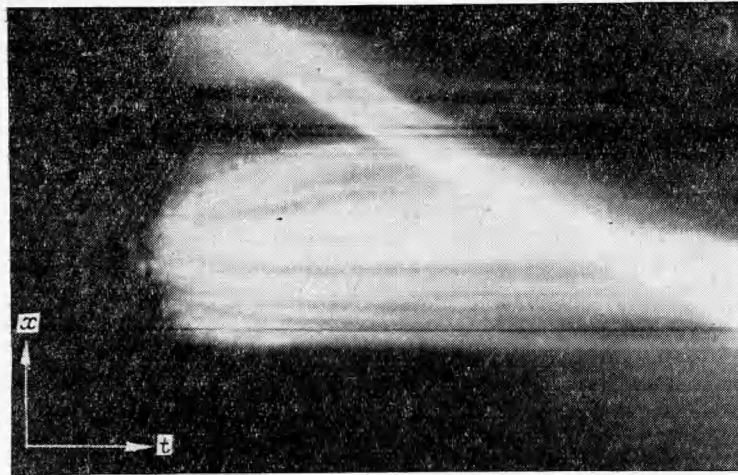


Рис. 3. Фотограмма взрыва заряда смеси гексогена с CCl_4 .

где u_1 и u_2 — массовая скорость первой и второй компоненты; α — весовая доля первой компоненты. Значения u_1 и u_2 берутся с ударных адиабат компонент, которые рассчитывались по обобщенной $D(u)$ -зависимости [1]

$$D = C_0 + 2u - 0,1 \frac{u^2}{C_0}, \quad (4)$$

где C_0 — объемная скорость звука в веществе при начальных условиях. Значения C_0 для использованных компонент приведены в табл. 2.

Состояния в преграде для зарядов тротила были измерены в работах [29—31], а для зарядов из смеси ТНТ/NaCl — в работе [1]. Эти данные приведены на рис. 4.

В экспериментах подбирались активные заряды таким образом, чтобы в серии параллельных опытов (обычно три) получить либо все взрывы зарядов исследуемых смесей, либо все отказы. Затем методом отражения на p, u -диаграмме рассчитывалось давление ударной волны в смеси: для взрывов — p_+ , для отказов — p_- . За $p_{кр}$ для данной смеси принималось значение p_+ . Точность определения $p_{кр}$ лимитируется точностью получения ударной адиабаты каждой компоненты, разбросом свойств активного заряда и данных рис. 4, и по нашим оценкам составляет 6÷8%. Эту точность не следует путать с различием p_+ и p_- .

4. Экспериментальные данные по $p_{кр}$ приведены в табл. 3. Как видно, характерной особенностью для всех исследуемых смесей является монотонное возрастание $p_{кр}$ с увеличением размера зерна (что эквивалентно уменьшению удельной поверхности гексогена). Наши данные согласуются с результатами работы [15] и хорошо объясняются с позиций механизма «взрывного горения». Другая особенность заключается в том, что для смесей на основе перекристаллизованного гексогена $p_{кр}$ несколько превышает таковые для смесей на основе заводского гексогена. Это можно объяснить тем, что у заводского гексогена поверхность зерна увеличена по сравнению с перекристаллизованным за счет большого числа дефектов как тонкой структуры (дислокации), так и грубой (трещи-

Таблица 2

Начальные плотности и скорости звука компонент

Параметры	Гексоген	CCl_4	C_6H_{14}	H_2O
ρ_0 , г/см ³	1,8	1,595	0,654	1,0
C_0 , км/с	2,55	0,934	1,08	1,48

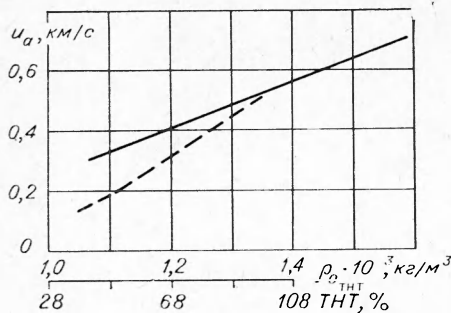


Рис. 4. Зависимость массовой скорости преграды от свойств активного заряда. Сплошной линии соответствует верхняя ось абсцисс, штриховой — нижняя.

тур ударного сжатия компонент смесей следует, что различие в температурах гексана и гексогена меньше, чем для воды (или CCl_4) и гексогена. С позиций только одного поджигания это обстоятельство не объясняется. По-видимому, здесь играет роль развитие реакции от поджигания до детонационного режима или условия, сопровождающие этот процесс (рост скорости горения гексогена с давлением, диффузия продуктов горения ВВ в наполнитель, деструкция наполнителя и т. д.).

5. Для выяснения характера поджигания решалась нестационарная задача теплопроводности с граничными условиями 4-го рода. Рассматривался шар (зерно) ВВ, окруженный слоем наполнителя (см. рис. 1). В начальный момент времени ($t=0$) после прохождения ударной волны температура ВВ — T_0 , а наполнителя — T_n .

Для данной модели уравнения теплопроводности записывались в форме [33] (начало координат находится в центре)

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \kappa_1 \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \right\}, \quad t > 0, \quad R_1 > r \geq 0;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \kappa_2 \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \right\}, \quad t > 0, \quad R_2 > r > R_1.$$

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$T_1(r, 0) = T_0; \quad T_2(r, 0) = T_n; \quad t = 0;$$

$$T_1(r, t) = T_2(r, t), \quad r = R_1, \quad t > 0;$$

$$-\lambda_1 (\partial T_1 / \partial r) = -\lambda_2 (\partial T_2 / \partial r), \quad r = R_1, \quad t > 0;$$

$$T_2(R_2, t) = T_3; \quad T_1(0, t) \neq \infty.$$

Здесь κ и λ — температуропроводность и теплопроводность; T — температура; индексы 1 и 2 относятся к ВВ и наполнителю соответственно; T_3 — температура на внешней границе наполнителя. Решение системы получено в аналитическом виде

$$T_1(r, t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \text{res } \Phi(\alpha_n) \exp\left(-\frac{\alpha_n^2 \kappa_1}{R_1^2} t\right), \quad R_1 > r \geq 0;$$

$$T_2(r, t) = T_n + \sum_{n=1}^{\infty} \text{res } \Psi(\alpha_n) \exp\left(-\frac{\alpha_n^2 \kappa_1}{R_1^2} t\right), \quad R_2 > r > R_1,$$

ны, раковины). Это было установлено при рентгеноструктурном анализе соответствующих порошков. Увеличение же поверхности зерен ВВ приводит и к увеличению их реакционной способности [32]. Таким образом, можно считать, что $\rho_{кр}$ смесей гексогена с наполнителем зависит от способа приготовления кристаллов гексогена.

Как следует из результатов эксперимента, при постоянном размере зерна чувствительность исследованных смесей неодинакова: величины $\rho_{кр}$ близки между собой в случае воды и CCl_4 и примерно на 10^3 МПа ниже в случае гексана. В то же время из результатов расчета темпера-

Т а б л и ц а 3

Результаты инициирования смесей гексогена с жидкими наполнителями

\bar{d} , мм	Гексан				Вода				Четыреххлористый углерод			
	заводской		перекристаллизованный		заводская		перекристаллизованная		заводской		перекристаллизованный	
	p_-	p_+	p_-	p_+	p_-	p_+	p_-	p_+	p_-	p_+	p_-	p_+
0,135	25*	27	26	28	34	36	38	40	36	39	40	42
0,242	26	27	27	29	35	38	40	42	37	39	41	43
0,306	30	34	32	35	40	44	41	45	40	42	41	47
0,314	34	36	40	42	45	46	50	52	50	52	53	55
0,485	47	49	58	60	60	64	70	72	69	71	70	73
0,80	72	73	80	82	81	85	90	91	86	88	93	98

* Все величины давлений приведены в единицах 100 МПа (кбар).

где α_n — корни характеристического уравнения

$$\lambda_2 \left[\sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \alpha \operatorname{ctg} \left(\sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \frac{R_1 - R_2}{R_1} \alpha \right) + 1 \right] + \lambda_1 (\alpha \operatorname{ctg} \alpha - 1) = 0.$$

Функции $\operatorname{res} \Phi(\alpha_n)$ и $\operatorname{res} \Psi(\alpha_n)$ имеют довольно громоздкий вид, поэтому приводим только одну из них:

$$\operatorname{res} \Phi(\alpha_n) = \frac{R_1}{r} \sqrt{\frac{1}{\kappa_1 \kappa_2}} \frac{\sin \left(\frac{ru}{R_1 - R_2} \right)}{\alpha_n \sin \alpha_n} \left\{ \frac{R_2 \lambda_2 (T_3 - T_H) \sin \alpha_n +}{\lambda_2 (1 + u) \sin \alpha_n + (\lambda_2 - \lambda_1) \times} \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{\kappa_2 R_1}{\kappa_1 \alpha_n}} (T_H - T_0) \left[\lambda_2 \left(\alpha \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \cos u + \sin u \right) \sin \alpha_n + \lambda_1 (\alpha_n \cos \alpha_n - \sin \alpha_n) \sin u \right] \right\} \\ \times u \cos u \sin \alpha_n - \left(\lambda_1 + u \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \lambda_2 \right) \sin u \sin \alpha_n + \left(\lambda_1 u + \alpha_n \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \lambda_2 \right) \cos u \cos \alpha_n \Bigg\},$$

$$\text{где } u = \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \frac{R_1 - R_2}{R_1} \alpha_n.$$

Расчет распределения температуры по зерну и наполнителю и периода индукции зажигания проводился на ЭВМ Минск-22. Анализ результатов счета показал, что зерно ВВ за времена ударного сжатия прогревается с поверхности всего лишь на глубину 10^{-6} см, при этом температура зажигания достигается за времена $10^{-8} \div 10^{-10}$ с на глубине порядка 10^{-7} см.

Таким образом, температура поверхности зерна за очень короткий промежуток времени повышается практически до температуры наполнителя, все же зерно остается при своей температуре. Этим и объясняется возможность зажигания зерна ВВ окружающим наполнителем. Следует отметить, что постоянство температуры зерна свидетельствует в пользу предположения об отсутствии выравнивания температуры между компонентами смесей, которое было заложено при расчете их ударных адиабат.

В заключение отметим, что полученные в работе результаты в основном подтверждают механизм поджигания зерен ВВ с поверхности, но их нельзя рассматривать как доказательство его однозначности. К такому же выводу пришел автор работы [34], изучая инициирование химического разложения нитрометана слабыми ударными волнами.

Поступила в редакцию
9/1 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Афанасенков. Канд. дис., ИХФ АН СССР, 1969.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.

3. H. Eiring, D. E. Powell a. o. Chem. Rev., 1949, 45, 69.
4. I. W. Taylor. Detonation in condensed Explosives. Oxford, 1952.
5. G. B. Cook. Proc. Roy. Soc., 1958, A246, 146.
6. Ф. Броуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах. М., ИЛ, 1963.
7. G. P. Sachia, E. G. Whitbread. Proc. Roy. Soc., 1958, A246, 268.
8. G. E. Seay, L. B. Seely. J. Appl. Phys., 1961, 32, 1092.
9. С. Н. Johansson. Proc. Roy. Soc., 1958, A246, 160.
10. I. H. Blackburn, L. B. Seely. Nature, 1962, 194, 370.
11. A. W. Campbell, W. L. Davis a. o. Phys. Fluids, 1961, 4, 4, 498.
12. S. J. Jacobs, T. R. Liddiard, B. T. Drimmer. 9-th Symposium (International) on Combustion, N. Y.—London, 1963.
13. А. К. Парфенов. Канд. дис., ИХФ АН СССР, 1967.
14. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1968, 4, 3, 400.
15. R. H. Dinagar, R. H. Rochester, M. S. Millican. Explosivstoffe, 1963, 9, 188.
16. N. Griffiths, N. Laidler, S. T. Spooner. Comb. and Flame, 1963, 7, 4, 347.
17. J. Eadie. 4-th Symposium on Detonation, White Ooka, Md., 1966, Washington, 1967, p. 399.
18. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1939, 9, 12.
19. Я. Б. Зельдович. Докл. АН СССР, 1963, 150, 2.
20. А. Г. Мержанов, В. Г. Абрамов, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 1.
21. В. Н. Вилунов, А. К. Колчин. ФГВ, 1966, 2, 3.
22. А. П. Гинстлинг. ЖПХ, 1951, 24, 566.
23. Л. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
24. В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1958, 120, 1271.
25. Л. З. Рушинский. Математическая обработка результатов эксперимента. М., «Наука», 1970.
26. А. Н. Дремин, И. А. Карпухин. ПМТФ, 1960, 3, 184.
27. А. Дж. Чабай. В сб. Механика горных пород. Под ред. Н. В. Мельникова и А. П. Протодяконова. М., «Недра», 1966.
28. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомоллов, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1969, 4, 137.
29. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1959, 127, 6, 1995.
30. А. Я. Апин, Л. Н. Стесик, Н. С. Шведова. Докл. АН СССР, 1961, 137, 4, 909.
31. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1961, 140, 1, 179.
32. Химия твердого состояния. Под ред. В. Гарнер. М., ИЛ., 1961.
33. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
34. S. P. Gill. Astronautica Acta, 1970, 15, 5—6, 427.

УДК 532.593.044 : 546.814—31

ТВЕРДОФАЗНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ SnO₂ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

Е. Г. Аввакумов, В. Е. Дьяков, А. И. Матыцин, А. М. Ставер
(Новосибирск)

В литературе отмечалось сходство химических процессов, инициируемых ударными волнами в твердых телах, с процессами, идущими под действием давления и сдвига [1], а также с механохимическими процессами [2]. Данная работа проведена с целью выяснить, насколько полна аналогия между химическими реакциями, идущими под действием ударных волн, и реакциями, идущими при совместном истирании смесей в высоконапряженных измельчительных аппаратах. Исследовались следующие реакции:

