

## О ВОЗНИКНОВЕНИИ ВЗРЫВА ПРИ УДАРЕ

Б. Н. Кондриков, В. Д. Чубаров

(Москва)

Механизм возникновения взрыва жидких взрывчатых веществ (ВВ) при ударе детально рассмотрен Ю. Б. Харитоном [1]. Н. А. Холево [2] и К. К. Андреев [3], Ридил и Робертсон [4] считали, что течение вещества определяет возможность разогрева и взрыва при ударе и в случае твердых ВВ. Исследования возбуждения взрыва твердых ВВ ударом с использованием тензометрической записи давления во времени и других новых методов были проведены в [5, 6]. Установлено, в частности, что при достижении некоторого давления таблетка ВВ, находящаяся между соударяющимися поверхностями, разрушается, причем давление при разрушении резко (в течение приблизительно  $10^{-5}$  сек) падает. Момент взрыва обычно близок к моменту разрушения, однако возникает ли взрыв до, после или в ходе разрушения прямым измерением, установить не удалось ввиду большой скорости процесса. По-прежнему неясен также механизм разогрева, в частности, возможность воспламенения ВВ в результате повышения температуры в слое расплава под действием сил внутреннего трения (подобно тому, как это возможно в случае жидких ВВ [1]). Известный интерес представляет и вопрос о том, сколь существенна разница в характере поведения ВВ при ударном и при обычном статическом сжатии.

В настоящей работе изучалось поведение ряда твердых ВВ при ударе на копре и медленном сжатии на гидравлическом прессе<sup>1</sup>.

### ПОВЕДЕНИЕ ВВ ПРИ УДАРЕ

Опыты по ударному сжатию проводились с помощью копра К-44-II [7] в приборчике (№ 4) со свободным истечением вещества [8], верхний ролик которого обтачивался на токарном станке, образуя цилиндрический ударник диаметром 12 и длиной 5—7 мм. На нижний ролик помещалась таблетка ВВ диаметром 18—19 мм, прессовавшаяся отдельно при давлении до 2500 ат. Торцы роликов полировались. Коэффициент восстановления копра, определявшийся в каждой серии опытов, составлял  $0,70 \pm 0,02$ . Вес части таблетки, находившейся под ударником  $m$ , менялся от 7 до 100 мг, толщина  $h_0$  — от 0,07 до 0,6 мм. Обычно в серии при одних и тех же условиях проводилось не менее 20 опытов. Испытывались дина, тротил, тетрил, тэн, а также некоторые другие вещества. Дина перекристаллизовывалась из этилового спирта, остальные ВВ измельчались и просеивались. Отбиралась фракция между ситами № 38 и 64 (150—100 мк).

Результаты опытов удобно представить в виде гистограмм (рис. 1), где по оси абсцисс меняются вес находящейся под ударником части таблетки (или ее толщина) и число опытов, а по оси ординат — величина поглощенной при ударе энергии  $\Delta A$ , представляющая собой произведение веса груза на разность высот отскока при холостом ударе и при ударе по таблетке ВВ. Точками отмечены: 1 — «упругая» деформация таблетки (разность высот таблетки до и после удара ( $\Delta h$ ) не превы-

<sup>1</sup> В проведении опытов принимали участие Т. Г. Руднева, Г. Д. Козак и Т. М. Жукова.

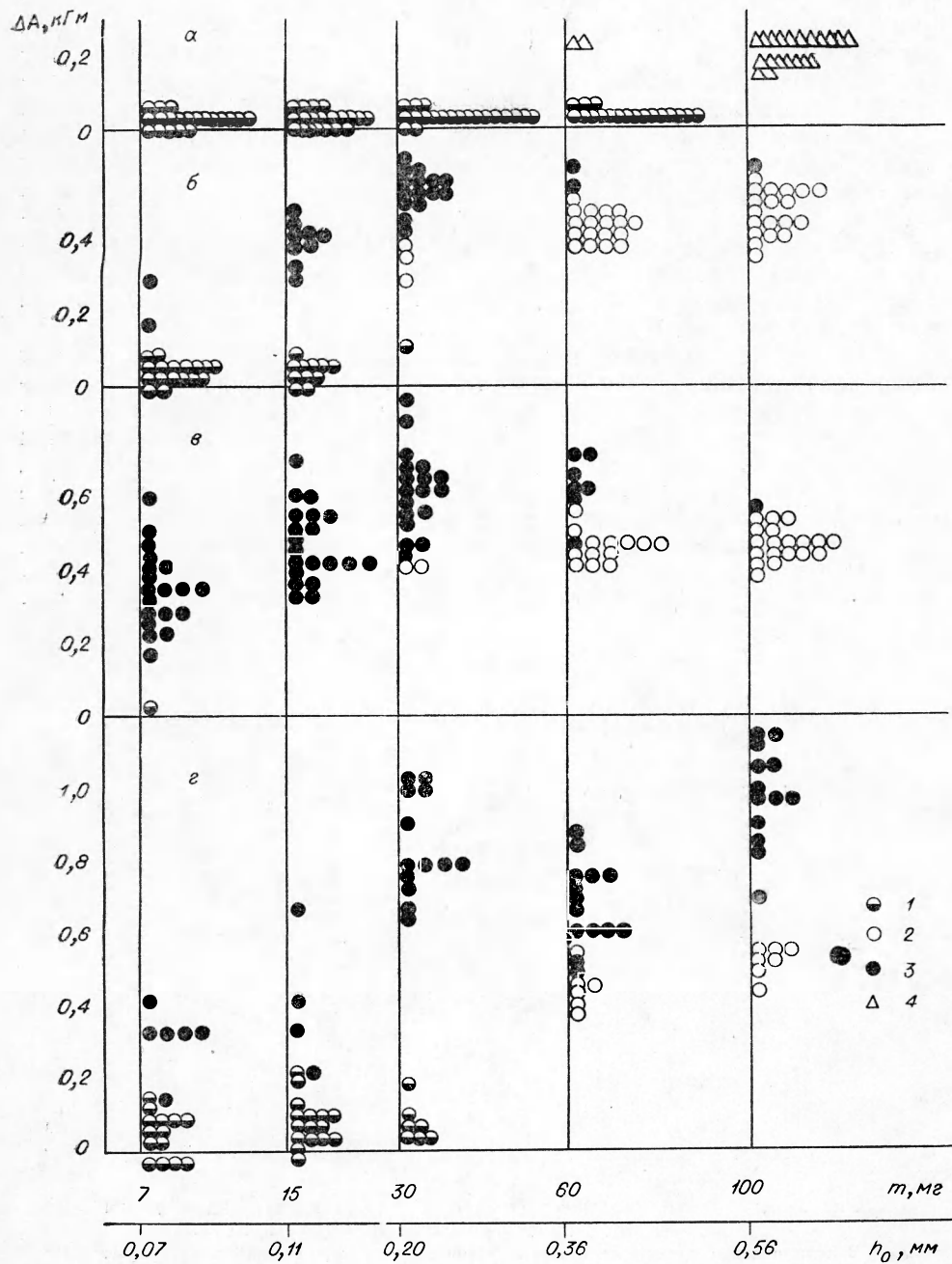


Рис. 1. Энергия, поглощенная при ударе по таблеткам дины (а, б, в) и тэна (г), в зависимости от веса  $m$  или толщины  $h_0$  таблетки. Диаметр ударника 12 мм; груз 10 кг.

шает  $0,1 h_0$ ,  $\Delta A$  очень мало); 2 — разрушение (сопровождается резким сильным «щелчком», облачком пыли ВВ и выбросом из-под ударника летящих с большой скоростью частиц  $\Delta h \approx h_0$ ,  $\Delta A$  велико); 3 — взрыв (появление дыма, иногда пламени, запаха разложения ВВ, следов горения на роликах, звук такой же, как при разрушении, или более сильный, нередко образование облачка пыли ВВ и выброс частиц его;  $\Delta h \approx h_0$ ,  $\Delta A$  велико); 4 — выдавливание части ВВ из-под ударника. Разница между разрушением и взрывом в ряде случаев (особенно для таких ВВ, как тротил) мала, и отличить один от другого бывает нелегко. В некоторых условиях удара возможно также выдавливание части таблетки ( $\Delta h \approx 0,5 h_0$ ) из-под ударника, происходящее, в отличие от обычного разрушения, почти беззвучно и, очевидно, более медленно.

Типичные случаи поведения ВВ при ударе: при малой энергии удара и тонких таблетках — упругая деформация, при более толстых — выдавливание (см. рис. 1, а). При большей энергии и тонких таблетках — упругая деформация или взрыв, при более толстых — взрыв или разрушение (см. рис. 1, б—г).

Средняя величина  $\Delta A$  при разрушении и взрыве слабо зависит от толщины таблетки и общей энергии удара. Обращает внимание характерное для опытов по возбуждению взрыва ударом значительное рассеяние результатов: во многих случаях при одних и тех же условиях возможны и упругая деформация, и взрыв, или разрушение и взрыв, или и то, и другое, и третье. Очень велик разброс значений  $\Delta A$ , вполне соизмеримый во многих случаях со средним значением этой величины<sup>1</sup>.

В связи с этим неожиданным оказался тот факт, что во многих случаях существует некая достаточно определенная величина поглощенной энергии ( $\Delta A_{кр}$ ), выше которой почти во всех опытах проис-

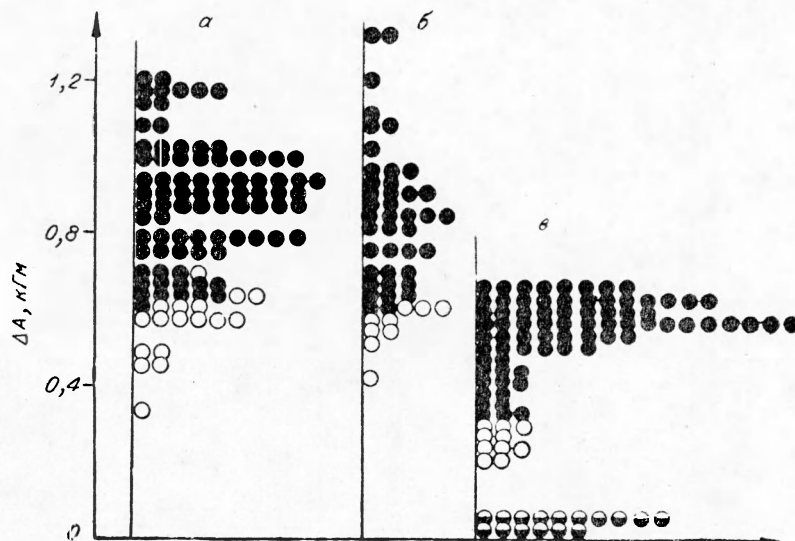


Рис. 2. Энергия, поглощенная при ударе по таблеткам тетрила (а), тэна (б) и дины (в). Диаметр ударника 12 мм; груз 10 кг.

Высота падения груза (см) и вес таблетки (мг) соответственно: а — 20 и 45; б — 20 и 60; в — 10 и 30. (Обозначения см. на рис. 1.)

<sup>1</sup> Сходным образом вели себя при ударе и невзрывчатые вещества — нафталин и бензойная кислота. И для них при одной и той же энергии удара и толщине таблетки возможны и упругая деформация, и разрушение, и «выдавливание». Так же велик и разброс значений  $\Delta A$  при разрушении.

ходил только взрыв, ниже — только разрушение. Чтобы установить, не связана ли эта необычная для возбуждения взрыва ударом определенность с недостаточным числом опытов, было проведено по 100 опытов для тетрила и дины и 50 для тэна (рис. 2) в условиях, где частота взрывов была значительной. И в этом случае критическая энергия, необходимая для взрыва, фиксировалась достаточно четко.

Несколько иная картина наблюдалась в случае тротила. Взрывы его обычно происходили нерегулярно, чередуясь с отказами во всем интервале значений поглощенной при ударе энергии<sup>1</sup>. Однако в нескольких сериях опытов  $\Delta A_{кр}$  установить удалось.

Значения  $\Delta A_{кр} \cdot 10^{-8}$  (эрг) по всем сериям, состоящим из 20 опытов на копре К-44-II с грузом 10 кг, диаметром ударника 12 мм, диамет-

Таблица 1

Критическая энергия, поглощенная таблеткой ВВ при ударе, при которой возникает взрыв

Навеска ВВ, мг	Высота падения груза, см								
	10	20	10	20	20	10	20	20	36
	Дина		Тэн		Тротил	Тротил	Порох НБ	Перхлорат аммония	
7	~0,15 <0,30	<0,17	~0,15	~0,2					
15	<0,29 <0,33	<0,33	~0,25	0,2	<0,38				
20	~0,35 <0,39							<0,53	
30	0,38 0,40 ~0,40 0,30*	0,43		<0,63 <0,40	<0,44		0,47	<0,84	
40	<0,45 <0,47								
45		0,51 0,51		<0,63	0,63 0,62*	>0,67			
60	0,51	0,58 >0,51 ~0,50		0,45 0,57 0,60**		>0,5	>0,5		<1,37
100	~0,58	~0,55		0,62	>0,8	>0,6	>0,73	~0,75	<1,44
150									~1,7
200									~1,9

Примечание. Знак < обозначает, что в данной серии опытов были взрывы, но не было разрушений (отказов); > — были разрушения, но не было взрывов.

\* 100 опытов.

\*\* 50 опытов.

<sup>1</sup> При добавлении к тротилу 5% песка (размер частиц ~ 0,12 мм) взрывы (высота падения груза 10 см, навеска 60 мг) регулярно происходили при  $\Delta A > 0,45$  кгм и не наблюдались при  $\Delta A < 0,40$  кгм.

ром нижнего ролика 19 мм (торцы роликов полированные), приведены в табл. 1. Во многих случаях определенно эту величину установить было нельзя: происходили либо только взрывы, разрушений (отказов) не было, либо только разрушения, не было взрывов. В первом случае в таблице указывается, что наименьшее значение  $\Delta A > \Delta A_{кр}$ , во втором — наибольшее значение  $\Delta A < \Delta A_{кр}$ .

Из табл. 1 видно, что  $\Delta A_{кр}$  слабо зависит от высоты падения груза и существенно растет при увеличении навески ВВ. Для тэна и дины в пределах разброса результатов величина  $\Delta A_{кр}$  практически одинакова. Тетрил (при  $m \geq 45$  мг) и порох НБ (при  $m = 100$  мг) обнаружили заметно более высокие значения критической энергии; тротил (45 и 100 мг) при энергии более высокой, чем необходимая для взрыва тэна и дины, не взрывался; значения  $\Delta A_{кр}$  для перхлората аммония были выше, чем полученные экстраполяцией для тэна и дины.

### ПОВЕДЕНИЕ ВВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Опыты по медленному сжатию таблеток ВВ проводились на ручном 13-тонном гидравлическом прессе. Таблетка ВВ сдавливалась между полированными поверхностями двух стальных роликов, рост давления до максимума происходил в течение нескольких минут. Характер поведения ВВ при этом в известной мере сходен с описанным выше для удара.

Таблица 2  
Поведение таблеток при сжатии на гидравлическом прессе (таблетки весом 0,2 г, диаметром 10 мм прессовались предварительно до давления  $\sim 300$  кг/см<sup>2</sup>)

Вещество	Число взрывов	Число разрушений	$\bar{p}_{взр}$ , кбар	$\bar{p}_{ср}$ разр., кбар
	п и подъеме давления	при сбросе давления		
<i>Диаметр рабочей части верхнего ролика 12 мм (<math>p_{макс} = 8400</math> ат)</i>				
Гексоген . . . . .	2/18	4/2	8,0; 5,4	2,4
Тэн . . . . .	2/9	3/0	7,6; 5,0	2,5
Дина . . . . .		5*/5		
Тротил . . . . .	0/5			7,2
Порох НБ . . . . .	2/0		8,4; 7,6	
<i>Диаметр рабочей части верхнего ролика 8 мм (<math>p_{макс} = 19000</math> ат)</i>				
Гексоген . . . . .	0/1	8/0		5,7
Тэн . . . . .	0/4			2,0
Дина . . . . .	0/1	5/0		3,8
Тротил . . . . .	1/10		9,4	7,2
Пикриновая кислота . . . . .	1/21		17/1	2,5
Бензойная кислота . . . . .	0/15	0/1		6,3

Примечания: 1. В одном опыте могло быть несколько «щелчков» — разрушений, но взрыв только один. 2.  $p_{взр}$  — давление, при котором наблюдались взрывы;  $\bar{p}_{ср}$  разр. — среднее давление, при котором происходило разрушение таблетки («щелчок») без взрыва.

\* В двух опытах неясно — разрушение или взрыв.

\*\* Пять опытов.

При сжатии наблюдалось: а) упругая деформация таблетки, б) спокойное выдавливание ее при достижении определенного давления, в) разрушение с резким сильным «щелчком» (часть навески — или вся навеска целиком — выбрасывается из-под ролика), г) взрыв (обычно более сильный звук, дым, пламя, следы горения на роликах<sup>1</sup>). Взрыв

<sup>1</sup> Иногда, так же как и при ударе, разницу между разрушением и взрывом трудно было уловить.

вы и разрушения происходили как при повышении, так и при сбросе давления, осуществлявшемся резким поворотом вентиля пресса. Нередко при подъеме давления происходило несколько «щелчков» — разрушений, а затем взрыв. Давление, при котором происходили взрывы, обычно выше давления, при котором наблюдалось разрушение. В табл. 2 приведены результаты опытов при диаметрах рабочей части верхнего ролика 12 и 8 мм. Гексоген, тэн и дина при 12 мм дали по 5—6 взрывов из 10 опытов, тротил в этих условиях не взрывался. При уменьшении диаметра до 8 мм взрывы гексогена и дини происходили только при сбросе давления, тэн не взрывался, пикриновая кислота и тротил дали по одному взрыву. Тетрил, гексанитродифенилсульфид, смесь тротила с 2% парафина, амматол 80/20, 62%-ный динамит и 10%-ный гремучий студень во всех опытах выдавливались спокойно, ни «щелчков», ни взрывов не происходило.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты опытов позволяют сделать вывод, что взрыв таблетки ВВ при ударе тесно связан с ее разрушением: взрывы лежат в той же области значений  $\Delta A$ , что и разрушения, по характеру сопутствующих явлений очень близки к ним и требуют обычно лишь несколько большей затраты энергии. Достаточно наглядна эта связь и в случае статической деформации. Взрывы происходят только при тех условиях (и с теми ВВ), при которых наблюдаются случаи разрушения, близки к ним по характеру, но требуют обычно лишь несколько большего давления.

Логично предположить, что взрыв возникает при разрушении таблетки в том случае, когда интенсивность разрушения, т. е. скорость движения вещества в пространстве между роликами, и поглощенная при этом энергия достаточно велики. При движении в результате трения ВВ о поверхность роликов возникает разогрев, приводящий к плавлению вещества и образованию у поверхности тонкого слоя расплава. Температура слоя за счет работы против сил внутреннего трения повышается, происходит воспламенение. Критическое условие воспламенения можно найти, предположив, что период индукции  $t_i$  по порядку величины равен времени выброса вещества из пространства между роликами

$$t_i \simeq \frac{r_0}{u}, \quad (1)$$

где  $r_0$  — радиус ролика;  $u$  — средняя скорость движения ВВ. Период индукции (для реакции нулевого порядка) получим из теории воспламенения [9]:

$$t_i \simeq \frac{c}{qB} \frac{RT_B^2}{E} e^{E/RT_B}, \quad (2)$$

где  $c$  — теплоемкость;  $q$  — теплота реакции;  $B$  — предэкспонент;  $E$  — энергия активации;  $T_B$  — температура слоя расплава.

В уравнениях (1) и (2) неизвестны значения  $u$  и  $T_B$ . Для их определения нужно знать динамику образования слоя расплава и повышения температуры в нем. Сколько-нибудь строго описать этот процесс пока не представляется возможным. Ограничимся поэтому приближенным расчетом при усредненных значениях скорости, а также вязкости и толщины слоя расплава.

Предположим, что часть таблетки в виде треугольника с вершиной в центре таблетки и основанием  $a$ , достаточно малым, чтобы кривизной его можно было пренебречь, движется со скоростью  $u$  между поверхностями ударника и наковальни по радиусу от центра к периферии, скользя по слоям расплава толщиной  $\delta$ , прилегающим к этим поверхностям. Если расстояние по радиусу от образующей ударника до вершины треугольника в данный момент равно  $r$ , то величина поверхности, на которой действует сила трения,  $S(r) = \frac{a r^2}{r_0}$ . Сила трения в ламинарном слое расплава  $f = -\eta \frac{u}{\delta} \cdot S(r)$ , где  $\eta$  — коэффициент вязкости. Работа против сил трения на пути  $dr$  равна

$$dA = -\eta \frac{u}{\delta} \frac{dr^2}{r_0} \cdot dr.$$

Интегрируя от  $r_0$  до 0, получим

$$A = \eta u a r_0^2 / 3\delta$$

или для всех треугольников, из которых состоит разрушающаяся таблетка,

$$A_{\text{тр}} = \sum_1^{2\pi r/d} A = \frac{2}{3} \frac{\pi \eta u r_0^3}{\delta}. \quad (3)$$

Эта работа расходуется на разогрев слоя толщиной  $\delta$  до температуры  $T_b$ :

$$\delta \approx \frac{A_{\text{тр}}}{2\pi r_0^2 \rho [c(T_b - T_0) + L]}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность ВВ;  $L$  — скрытая теплота плавления. Из (3) и (4) получим

$$A_{\text{тр}} \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \pi r_0^2 \sqrt{r_0 \eta \rho [c(T_b - T_0) + L] u} \approx b \cdot u^{0.5}. \quad (5)$$

Работа разрушения  $\Delta A_{\text{кр}}$  складывается из работы сил трения  $A_{\text{тр}}$ , кинетической энергии, приобретенной навеской ВВ, и работы пластической деформации  $A_{\text{пл}}$ . На основании опытов, в которых разрушение не происходит, можно полагать, что последняя величина для изучавшихся ВВ мала по сравнению с суммой двух первых. Пренебрегая ею, получим.

$$\Delta A_{\text{кр}} = b u_{\text{кр}}^{0.5} + \frac{u_{\text{кр}}}{2} \cdot m. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что при постоянной критической скорости движения слоя ВВ —  $u_{\text{кр}}$  величина  $-\Delta A_{\text{кр}}$  — линейная функция навески ВВ. Если нанести значения  $\Delta A_{\text{кр}}$  для тэна и дины на график в координатах  $m - \Delta A_{\text{кр}}$  (рис. 3)<sup>1</sup>, то получим, что по точкам для  $m$  от 7 до 60 мг можно провести прямую:  $10^{-8} \Delta A_{\text{кр}} = 0,1 + 8 m$ , эрг. Точки для  $m = 0,1$  г лежат значительно ниже прямой возможно потому, что при большой толщине таблетки последняя претерпевает не одно, а несколько разрушений [5]. Угловой коэффициент прямой позволяет рассчитать

<sup>1</sup> Для сравнения на график нанесены также некоторые данные, полученные с тетриллом, тротилом и порохом НБ (см. табл. 2).

среднюю скорость движения ВВ в пространстве между роликами:  $u_{кр} \approx 4 \cdot 10^4$  см/сек. Время выброса ВВ и период индукции зажигания получаются равными  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$  сек.

Температуру воспламенения рассчитаем из (2), приняв (данные для тэна [10]); в случае дины разница невелика):  $q=1400$  кал/г,  $c=0,4$  кал/г·град,  $B=10^{15,6}$  сек $^{-1}$ ,  $E=39\,000$  кал/г·моль. Получим  $T_b \approx 700^\circ\text{К}$ .

В уравнении (5) неизвестна величина  $\eta$ . Найдем ее из первого члена уравнения (6):  $\eta \approx 1 \cdot 10^{-1}$  пз. Толщина слоя расплава

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta r_0 u}{2\rho [c(T_b - T_0) + L]}} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

(при  $\rho=1,6$  г/см $^3$  и  $L=20$  кал/г [10]).

Размер и температура очага разогрева согласуются с оценками, сделанными в работах Ф. Боудена с сотр. [11]; порядок величины периода индукции воспламенения близок к продолжительности спада давления на осциллограммах, дающих изменение давления при ударе во времени [5, 6].

Таким образом, изучены условия возникновения взрыва нескольких вторичных ВВ при ударе на копре. Отмечено сходство между взрывом таблетки ВВ и ее разрушением, не сопровождающимся заметным разложением. Установлено существование вполне определенной критической величины поглощенной энергии при ударе энергии, достижение которой приводит к взрыву с вероятностью, близкой к единице. Если поглощенная энергия на 10—20% меньше этой величины, вероятность взрыва близка к нулю. Критическая энергия слабо зависит от общей энергии удара и в случае дины и тэна в определенном интервале изменения навески ВВ  $m$ ; линейно растет при увеличении  $m$ . Приближенным расчетом показано, что этой энергии достаточно для достижения за счет работы сил внутреннего трения в слое расплава ВВ у поверхности роликов температуры, при которой оказывается возможным воспламенение ВВ.

Основные характеристики процесса для дины и тэна в критических условиях (расчет с точностью до порядка величин): скорость движения ВВ в пространстве между роликами 400 м/сек; период индукции зажигания  $1 \cdot 10^{-5}$  сек; толщина слоя расплава несколько микрон; вязкость расплава  $1 \cdot 10^{-1}$  пз. Температуру, развивающуюся в слое расплава, расчет дает около  $700^\circ\text{К}$ .

Установлены возможность и некоторые условия возникновения взрыва при медленном сжатии тонкого слоя ВВ на гидравлическом

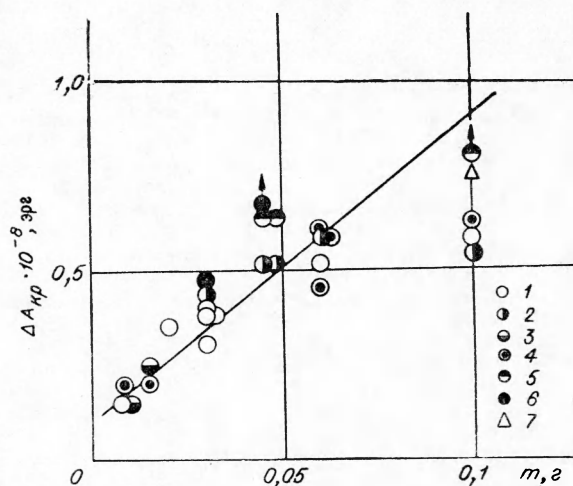


Рис. 3. Зависимость критической энергии, необходимой для возбуждения взрыва при ударе на копре, от навески ВВ (в скобках высота падения груза, см):

1 — дина (10); 2 — дина (20); 3 — тэн (10); 4 — тэн (20); 5 — тетрил (20); 6 — тротил (20); 7 — порох НВ (20).



прессе. Взрывы возникают как при повышении, так и при резком сбросе давления. (По-видимому, возникновение взрыва на стадии падения давления возможно и при ударе). Наряду со взрывами (так же, как при ударе) наблюдается разрушение таблетки ВВ, не сопровождающееся его разложением. Пластичные ВВ или вещества, содержащие небольшое количество легкоплавких примесей, взрыва при медленном сжатии не давали.

Высказано предположение о сходстве механизмов разрушения и взрыва при ударном и статическом нагружении. Не исключено, что аналогичный механизм разогрева возможен и при более высокой скорости воздействия (распространение и передача детонации, прострел пульей и т. д.).

Поступила в редакцию  
13/VIII 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Харитон. Сборник статей по теории взрывчатых веществ. Под ред. К. К. Андреева и Ю. Б. Харитона. М., Оборонгиз, 1940.
2. Н. А. Холево. Сб. «Физика взрыва», № 3. М., Изд. АН СССР, 1955; Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., Оборонгиз, 1963.
3. К. К. Андреев. Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., Оборонгиз, 1963.
4. E. K. Rideal, A. J. B. Robertson. Proc. Roy. Soc., 1948, A195, 12.
5. Л. Г. Болховитинов. Канд. дисс. М., 1960; Докл. АН СССР, 1959, 125, 3. 1961, 136, 3; Докл. АН СССР, 1961, 136, 6.
6. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1960.
7. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. Оборонгиз, 1960.
8. К. К. Андреев, Ю. А. Терехина. Сб. «Теория взрывчатых веществ». Оборонгиз, 1963.
9. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
10. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
11. Ф. Боуден, А. Иoffee. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.

УДК 536.468

### ГЕТЕРОГЕННОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В КИСЛОРОДЕ И ВОДЯНОМ ПАРЕ

М. А. Гуревич, Г. Е. Озерова, А. М. Степанов  
(Ленинград)

Опытом установлено [1], что предельная для воспламенения алюминиевой частицы температура среды с увеличением размера частицы сначала уменьшается, а затем возрастает, приближаясь к температуре плавления окисла. Последнее обстоятельство не может быть объяснено только на основании элементарной теории теплового взрыва, из которой следует, что температура среды на пределе самовоспламенения частицы падает с ростом размера частицы. Необходимо, следовательно, учесть дополнительно какой-то фактор, сильно влияющий на процесс