

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ  
ТНТ И ТГ 50/50  
УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ МАЛОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

*Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. П. Погорелов, В. А. Синицын  
(Москва)*

В большинстве практически важных случаев возбуждение детонации бризантных ВВ осуществляется путем воздействия на образец ударной волны. По этой причине экспериментальные исследования условий инициирования ВВ ударными волнами и нахождение количественной связи между основными параметрами инициирующей ударной волны, такими как амплитуда и профиль волны, ее длительность, представляют интерес не только для понимания процесса возбуждения детонации и теории инициирования, но имеют также большое прикладное значение.

Результаты изучения условий инициирования бризантных ВВ импульсным давлением изложены в ряде работ, например [1—6]. Основная часть экспериментальных данных получена при приложении к образцам ВВ импульсов давления большой длительности (характерное время действия импульса давления  $t_0 \geq 10^{-5} \div 10^{-6}$  с) с профилем давления, близким к прямоугольному. Их анализ показывает, что на возбуждение детонации влияют химический состав ВВ, его физические свойства, технология изготовления.

В последнее время начато изучение процесса инициирования гетерогенных ВВ ударными волнами малой и ультракороткой длительности [7—11]. Основной установленной экспериментально закономерностью является возрастание критического давления инициирования  $p_{\text{фр.кр}}$  с уменьшением  $t_0$ . Наиболее сильно эта закономерность проявляется в области малых значений  $t_0$ . Так, для состава В-3 [7] при уменьшении  $t_0$  с 1 до 0,2 мкс значение  $p_{\text{фр.кр}}$  возрастает примерно в 3 раза, достигая величины  $\sim 80 \cdot 10^8$  Па. Столь же сильная зависимость  $p_{\text{фр.кр}}$  от  $t_0$  получена для состава ТГ 50/50 в [10].

В работе [6] это влияние показано расчетным путем. Результаты экспериментальных исследований критических параметров инициирующей ударной волны для составов В-3 [7] и ТГ 50/50 [10] также указывают качественно на влияние градиента давления за фронтом ударной волны на величину  $p_{\text{фр.кр}}$ . Однако прямого экспериментального подтверждения этого факта не имеется.

В настоящей работе изучались условия инициирования ТНТ и ТГ 50/50 ударными волнами малой длительности. Для состава ТГ 50/50 представлены новые данные по сравнению с работой [10] в области малых значений  $t_0$ .

#### Постановка эксперимента

Ударная волна в ВВ, как и в [7, 10], генерировалась торможением на образце из исследуемого ВВ тонкого металлического ударника. Ударник разгонялся детонационной волной, распространяющейся по тонкому слою ВВ, наносимому на поверхность ударника (метод скользящей детонации). Для предотвращения откольных явлений в материале ударника между ним и слоем ВВ помещалась тонкая прокладка, имеющая малый акустический импеданс. По [10] ее наличие не влияет на скорость и симметрию движения ударника. Угол наклона ударника  $\theta$  к поверхности образца из ВВ [7] выбирался таким, чтобы обеспечивалась одновременность соударения летящего ударника с поверхностью ВВ. Реально измеренная разновременность удара не превышала 0,8 мкс.

Рис. 1. Зависимость скорости движения ударника от соотношения удельных масс ВВ и ударника.

$$1 - w_n = 2,24\alpha; \quad 2 - w_n = 5,1 \frac{\alpha}{\alpha + 2}$$

По определению,  $\sin \theta = w_n/D$ , где  $w_n$  — нормальная к поверхности ВВ составляющая скорости движения ударника;  $D$  — скорость детонации слоя ВВ, наносимого на поверхность ударника. Скорость стального ударника определялась в специальных опытах методом баллистического маятника. Результаты измерений представлены на рис. 1 в виде зависимости  $w_n(\alpha)$ , где  $\alpha = m_{ВВ}/m_{уд}$ ;  $m_{ВВ}$  — удельная масса ВВ;  $m_{уд}$  — удельная масса ударника. При  $0,3 \leq \alpha \leq 3,5$  зависимость  $w_n(\alpha)$  может быть описана выражением

$$w_n = kD \cdot \alpha/(\alpha + 2), \quad (1)$$

где  $kD = 5,1$  км/с.

Вид зависимости  $w_n(\alpha)$  подобен виду формулы Гарни [12], но коэффициент при члене  $\alpha/(\alpha + 2)$  больше. Значения скоростей  $w_n$ , вычисленные по (1), удовлетворительно согласуются с величинами  $w_n$ , рассчитанными по формуле

$$w_n = 1,2D \cdot (\sqrt{1,18\alpha + 1} - 1)/\sqrt{1,18\alpha + 1 + 1}$$

из работы [13]. Для  $\alpha < 0,3$  зависимость  $w_n(\alpha)$ , согласно результатам [14], принималась в виде  $w_n = 2,24\alpha$  км/с.

Из [12, 14] следует, что для сплошных металлических ударников (преград) конечная скорость их движения слабо зависит от сжимаемости материала ударника. Поэтому в настоящей работе для ударника из А1 зависимость  $w_n(\alpha)$  принималась такой же, как для стали. По известному для каждого опыта значению  $\alpha$  находились затем  $\theta$  и  $w_n$ . Величина нормальной составляющей скорости использовалась далее для расчетного определения параметров ударной волны, вводимой в образец из ВВ. Способ регистрации факта взрыва аналогичен описанному в [10].

Изменением толщины ударника варьировалась длительность импульса давления. Скорость соударения определяет амплитуду волны  $P_{фр}$  в образце ВВ. Для выявления влияния крутизны спада давления за фронтом ударной волны выполнены опыты с двумя типами ударника, которые отличались материалом (сталь и А1). Толщина ударников составляла 0,1—4,9 мм, и скорость ударника изменялась от 0,1 до 1,8 км/с.

Исследовались следующие составы ВВ: ТНТ прессованный плотностью  $\rho_0 = 1,51$  г/см<sup>3</sup> и литой состав ТГ 50/50 с  $\rho_0 = 1,67$  г/см<sup>3</sup>. Для исключения влияния геометрии и граничных условий в опытах, как правило, использовались образцы из ВВ цилиндрической формы диаметром 90 и 120 мм и высотой 40 и 70 мм соответственно. В условиях опыта (толщина ударника, скорость удара) глубина возбуждения детонации, если последняя возникала, была значительно меньше толщины образца.

### Экспериментальные результаты

В каждом опыте при известных параметрах экспериментальной сборки регистрировалось либо возбуждение детонации, либо ее отсутствие. Расчетом определялись далее зависимости основных параметров течения во времени на поверхности нагружаемого образца из ВВ. Волновая картина нагружения образца показана на рис. 2, а, б. В соответ-

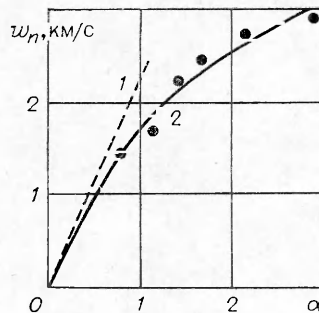




Рис. 2. Волновая картина нагружения образца ( $t_1 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \dots t_0$ ). а)  $x-t$ -диаграмма; б)  $p-u$ -диаграмма; в) зависимость давления на поверхности соударения от времени. 1 — ударная волна; 2, 3 — волны разгрузки.

ствии с постановкой опытов толщина ударника была много меньше толщины образца ВВ и динамическая жесткость материала ударника превосходила динамическую жесткость ВВ.

При торможении ударника на поверхности ВВ последовательно реализуются состояния: давления  $p_1, p_2, p_3 \dots$  и массовые скорости  $u_1, u_2, u_3 \dots$ . Зависимость давления, прилагаемого к поверхности ВВ, от времени имеет вид, показанный на рис. 2, в. При малых скоростях соударения веер характеристик узкий, и давление на границе раздела меняется практически скачком. В тех же предположениях о величине  $w_n$  временной интервал, в течение которого давление остается постоянным, близок ко времени циркуляции волны по толщине ударника

$$t_0 \approx t_2 - t_1 = 2\Delta_{уд}/c_{оуд},$$

где  $\Delta_{уд}$  — толщина ударника;  $c_{оуд}$  — скорость звука в материале ударника. Величина скачка давления  $p_1 - p_2, p_2 - p_3 \dots$  определяется соотношением динамических жесткостей материала ударника и ВВ. Чем меньше различие в динамической жесткости ударника и холодного ВВ, тем больше относительная величина  $(p_1 - p_2)/p_1$ . В частности, в акустическом приближении при равной динамической жесткости материала ударника и холодного ВВ в ВВ вводится прямоугольный импульс давления с амплитудой  $p_1$  и длительностью  $t_0$ .

В расчетах ударные адиабаты холодного ВВ задавались линейным  $D-u$ -соотношением (состав ТГ 50/50) [10]

$$D = 2,71 + 1,86u.$$

Здесь  $u$  и  $D$  выражены в км/с.

Для ТНТ ударная адиабата находилась методом интерполяции данных по ударной сжимаемости холодного ТНТ различной пористости [15]. В расчетах также принималось, что ударная адиабата и изэнтропа холодного ВВ совпадают. Волновые процессы в мате-



Рис. 3. Зависимость критических параметров инициирования состава ТГ 50/50 от длительности действия импульса.

1 —  $p_{фр.кр}(t_0)$ ; 2 —  $p_{фр}^2 t_0 = 300 \cdot 10^{10} \text{Н}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$ ; 3 —  $p_{фр} u_{фр} t_0 = 46 \text{ Дж/см}^2$ ; 4 — детонация; 5 — нет детонации.

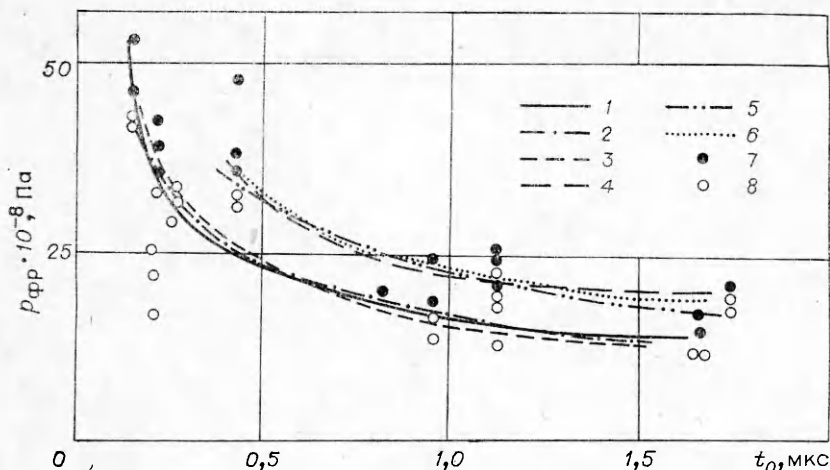


Рис. 4. Зависимость критических параметров инициирования ТНТ стальным (1—3) и алюминиевым ударником (5—6) от характерного времени действия импульса.

1,4 —  $p_{фр.кр}(t_0)$ ; 2 —  $p_{фр}^2 t_0 = 280 \cdot 10^{10} \text{Н}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$ ; 3 —  $p_{фр} u_{фр} t_0 = 54 \text{ Дж/см}^2$ ; 5 —  $p_{фр}^2 t_0 = 524 \cdot 10^{10} \text{Н}^2/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$ ; 6 —  $p_{фр} u_{фр} t_0 = 101,5 \text{ Дж/см}^2$ ; 7 — детонация; 8 — детонации нет.

риале ударника рассчитывались в акустическом приближении, при этом скорость звука в А1 принималась равной 5,25 км/с [16]. Сталь рассматривалась как упругопластическая среда с параметрами: упругий предел Гюгонио  $p_{н.в} = 16 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ,  $c_{упр} = 6,05 \text{ км/с}$  и  $c_{пл} = 4,5 \text{ км/с}$  [17].

В качестве основных параметров, характеризующих условия импульсного силового нагружения ВВ, приняты: амплитуда первого скачка давления  $p_{фр}$  ( $p_1$  на рис. 2) и его длительность  $t_0$ . Таким образом, результат каждого опыта представляется в плоскости  $p_{фр} - t_0$  одной точкой. Опыты при  $t_0 = \text{const}$ , но различных  $w_n$  в плоскости  $p_{фр} - t_0$  дают совокупность состояний, при которых детонация либо имеет место, либо не возбуждается. Вычисленные из опытных данных методом, описанным выше, состояния  $p_{фр}$ ,  $t_0$  для исследованных ВВ нанесены на рис. 3, 4.

Экспериментальные точки для ТГ 50/50 при  $t_0 = 0,05 \text{ мкс}$  получены в опытах в вакуумной камере (остаточное давление  $\sim 10^3 \text{ Па}$ ) с образцами толщиной 6 мм. Расчеты показали, что при столь малой длительности импульса давления ударная волна в холодном ВВ интенсивно затухает, и на выходе из образца ее амплитуда уменьшается примерно на порядок. В силу этого естественно предположить, что результат воздействия импульса давления на ВВ не изменится при увеличении толщины образца ВВ. Отметим, что в опытах с составом ТГ 50/50 при  $t_0 = 0,12 \text{ мкс}$ , выполненных в вакуумной камере и при атмосферном давлении воздуха, не зарегистрировано влияния воздушной прослойки между ударником и образцом ВВ на величину инициирующего давления.

#### Обсуждение экспериментальных данных

В плоскости  $p_{фр} - t_0$  результаты экспериментов в соответствии с [7, 10] могут быть разделены критической кривой инициирования  $p_{фр.кр}(t_0)$ , выше которой лежат состояния, где происходит возбуждение полной или частичной детонации, а ниже — состояния, для которых детонация отсутствует. Ход кривых  $p_{фр.кр}(t_0)$  для исследованных ВВ показывает

сильную зависимость критического давления инициирования от времени в области малых его значений. Аналогичная зависимость получена также для ряда других ВВ [7] и, по-видимому, закономерность возрастания  $p_{\text{фр.кр}}$  с уменьшением  $t_0$  является характерной для гетерогенных ВВ. Качественный ход кривых  $p_{\text{фр.кр}}(t_0)$ , как следует из настоящей работы и из [7], не изменяется при разных градиентах спада давления за фронтом ударной волны, вводимой в ВВ.

Для количественного описания процесса инициирования используются несколько критериев. На рис. 3, 4 проведены кривые, отвечающие энергетическому критерию  $p_{\text{фр.кр}} u_{\text{фр.кр}} t_0 = a$  и условию  $p_{\text{фр.кр}}^2 t_0 = b$  [9] ( $a$  и  $b$  — некоторые постоянные величины). Видно, что при  $0,05 < t_0 < 1,5$  мкс оба критерия удовлетворительно описывают совокупность экспериментальных данных и трудно отдать предпочтение одному из них. Из взаимного расположения критических и изоэнергетических кривых, отвечающих энергетическому критерию, следует, что ВВ, испытанные с одним типом ударника (т. е. при примерно равном среднем градиенте спада давления за фронтом волны), имеют различные чувствительности к ударному нагружению. Так, при  $t_0 = 1$  мкс инициирующее давление составляет: для ТГ 50/50  $\sim 15 \cdot 10^8$  Па, для ТНТ  $\sim 18 \cdot 10^8$  Па. Соответственно величина энергии  $E_{\text{кр}} = a$  равна: для ТГ 50/50 46 и для ТНТ 54 Дж/см<sup>2</sup> (ударник — сталь).

Взаимное положение кривых  $p_{\text{фр.кр}}(t_0)$  и критериальных кривых соответствует ряду чувствительности исследованных ВВ, получаемому стандартным методом. Полученные на образцах из ТНТ результаты с ударниками из стали и А1 (см. рис. 4) показывают, что в случае алюминиевого ударника кривая  $p_{\text{фр.кр}}(t_0)$  лежит значительно выше аналогичной кривой при стальном ударнике. Другими словами, при равных значениях  $t_0$  для возбуждения детонации алюминиевым ударником необходимо приложить к образцу большие давления. Этот факт может быть связан со скоростью спада давления за фронтом вводимой в образец ВВ ударной волны. Так, по расчету, в случае ударника из А1 и  $t_0 = 0,5$  мкс через 1,5 мкс после соударения действующее давление составляет лишь 9% от максимального, в то время как при стальном ударнике 46%.

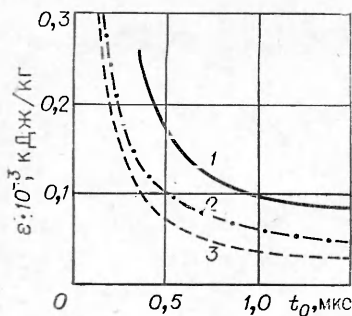
Таким образом, в первом случае скорость спада давления много больше, чем во втором. Аналогичная ситуация имеет место и для других значений  $p_{\text{фр.кр}}$  и  $t_0$ . Обращает на себя внимание резкое — почти в 2 раза — возрастание постоянной энергетического критерия инициирования: с 54 Дж/см<sup>2</sup> для стального ударника до 101,5 Дж/см<sup>2</sup> для ударника из А1.

Для дальнейшего анализа удобно представить экспериментальные данные в координатах  $\epsilon_{\text{фр.кр}}(t_0)$ , где  $\epsilon_{\text{фр.кр}} = p_{\text{фр.кр}} \cdot (V_0 - V_{\text{фр}})/2$  — критическая концентрация внутренней энергии ВВ. Величина  $t_0$ , определенная ранее, имеет смысл времени пребывания ВВ в состоянии с заданным  $\epsilon_{\text{фр}}$  вблизи границы соударения. Ход зависимости  $\epsilon_{\text{фр.кр}}(t_0)$  (рис. 5) показывает, что величина критической инициирующей внутренней энергии ударного сжатия холодного ВВ с увеличением  $t_0$  падает.

Сравнение результатов, полученных на ТНТ с ударниками из различных материалов, показывает, что различие в величине  $\epsilon_{\text{фр.кр}}$  возрастает при уменьшении  $t_0$ , т. е.

Рис. 5. Зависимость критической концентрации внутренней энергии ВВ от длительности действия импульса.

1, 2 — ТНТ; 3 — ТГ 50/50; 1 — алюминиевый ударник, 2, 3 — стальной.



влияние скорости выхода ВВ из заданного состояния (или градиента спада давления) проявляется больше при меньшей величине  $t_0$ .

Влияние градиента спада давления может быть объяснено следующим образом [2]. В состоянии с давлением  $p_{фр}$  (или концентрацией внутренней энергии  $\epsilon_{фр}$ ) химическая реакция взрывчатого превращения проходит еще недостаточно глубоко. При быстром спаде давления так же быстро уменьшаются плотность и температура, поэтому химическая реакция обрывается. Напротив, при медленном спаде давления плотность и температура медленно уменьшаются, продолжается химическая реакция взрывчатого превращения и возбуждается процесс детонации.

Таким образом, при рассмотрении задачи инициирования ВВ ударными волнами малой длительности необходимо учитывать не только значения  $p_{фр}$  (или  $\epsilon_{фр}$ ) и  $t_0$ , но также и скорость, с которой ВВ выходит из состояния ударного сжатия.

Поступила в редакцию  
24/IX 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
3. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
4. М. Я. Васильев. ФГВ, 1965, 1, 3.
5. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин. ФГВ, 1971, 7, 1.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1975, 222, 3.
7. Y. de Longueville, C. Fauquignon, H. Moulard. 6-th Symp. (International) on Detonation. California, 1976.
8. P. Howe, R. Frey et al. 6-th Symp. (International) on Detonation. California, 1976.
9. R. H. Stresau, J. E. Kennedy. 6-th Symp. (International) on Detonation. California, 1976.
10. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак и др. ФГВ, 1977, 13, 2.
11. Ю. В. Батюков, С. А. Новиков и др. ФГВ, 1979, 15, 5.
12. N. E. Hoskin, I. W. Allan et al. 4-th Symp. (International) on Detonation. Maryland, 1965.
13. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972.
14. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак и др. ФГВ, 1977, 13, 5.
15. Compendium of Shock Waves Date, Section C. Univ. of California, 1977.
16. K. A. Gschneidner. Solids State Phys., 1964, 16.
17. Compendium of Shock Wave Date. Univ. of California, 1966.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗРЫВА В РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЯХ

Г. Я. Алешин, В. Ф. Зайцев, С. М. Шестаков  
(Ленинград)

Одной из важных проблем, решение которой повысит безопасность эксплуатации содорегенерационных котлоагрегатов в целлюлозно-бумажной промышленности является проблема борьбы со взрывом, возникающим при разрыве экранных труб и попадании воды в расплав солей:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$  и др. В результате контакта воды с расплавом, имеющим температуру  $\sim 1100\text{K}$ , происходит взрыв, приводящий к выходу из строя оборудования и прекращению технологического процесса производства целлюлозы [1—3].