

9. Численное решение многомерных задач газовой динамики/ Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
10. Becker E. Relaxation effects in gas flow.— Fluid Dynamics Transactions, 1974, vol. 7, pt 1.
11. Борисов Ал. А., Борисов А. А. Динамика волн разрежения в веществе, находящемся в критической области жидкость — пар.— В кн.: Исследование по гидродинамике и теплообмену/Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск: изд. ИТФ СО АН СССР, 1980.
12. Анисимов М. А. Исследования критических явлений в жидкостях.— УФН, 1974, т. 114, № 2.
13. Томаповская В. Ф., Колотова Б. Е. Фреоны. Свойства и применение. Л.: Химия, 1970.
14. Erkmann J. O. Smooth spalls and the polymorphism of iron.— J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, N 5.
15. Иванов А. Г., Новиков С. А. Об ударных волнах разрежения в железе и стали.— ЖЭТФ, 1961, т. 40, № 6.
16. Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения.— ФТТ, 1962, т. 4, № 1.

УДК 662.215.12 — 398

ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННЫХ ВВ

*Л. В. Альтшулер, В. В. Балалаев, Г. С. Доронин,
В. С. Жученко, А. С. Обухов*

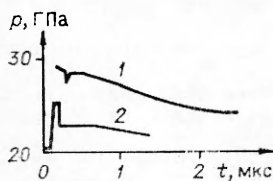
(Москва)

Взрывчатые вещества (ВВ), содержащие в качестве связующего или флегматизатора инертные органические добавки, широко используются в практике. Однако влияние этих примесей на характеристики детонации изучено недостаточно. В большинстве работ приводятся скорости детонации смесей [1—3], сведения же относительно давления продуктов взрыва ограничены и противоречивы. Так, по одним источникам примешивание к ВВ парафина повышает детонационное давление [4], по другим — приводит к противоположному результату [5, 6].

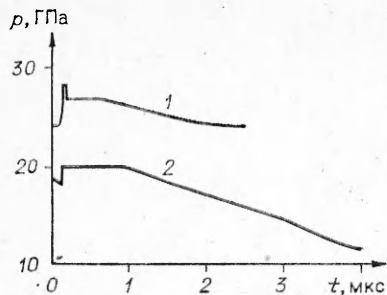
В данной работе с помощью манганиновых датчиков выявлены основные особенности детонации гексогена и тэна¹ содержащих 6% высокомолекулярных соединений парафинового ряда.

В зарядах исследуемых веществ, а также тротила диаметром 64 мм генерировались детонационные волны с плоским фронтом. В нескольких опытах диаметр заряда был равен 84 мм. На торцах зарядов располагались преграды из материалов с различной динамической жесткостью: меди, алюминия, плексигласа, этанола. Плоские манганиновые датчики, изолированные от электропроводящей среды слойками из фторопластовых пленок, соединенных вакуумной смазкой, помещались внутри заряда или на границе между ВВ и преградой. Сигнал записывался с помощью осциллографа С1-75, и по градуировочной зависимости, взятой из работы [7], определялся профиль давления $p(t)$. Скорость детонации измерялась электроконтактами с точностью $\pm 0,5\%$.

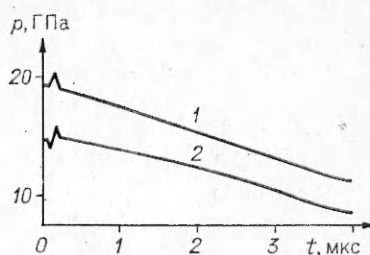
На фиг. 1 изображены зависимости $p(t)$, зарегистрированные манганиновыми датчиками для флегматизированного тэна плотностью $\rho = 1,655 \text{ г/см}^3$. Профиль 1 получен при введении датчика непосредственно в ВВ на расстоянии 120 мм от поверхности инициирования. Профиль 2 характеризует изменение давления на том же расстоянии на границе с алюминиевой преградой. На фиг. 2, 3 аналогичные кривые даны соответственно для флегматизированного гексогена ($\rho = 1,66 \text{ г/см}^3$) и тротила ($\rho = 1,56 \text{ г/см}^3$) при той же геометрии расположения датчика. Линии 1 относятся к давлению внутри заряда, линии 2 — к давлению на границе с плексигласом. Следует отметить, что записи в течение первых 0,15—0,25 мкс соответствуют волновым реверберациям в изоляции и в самом датчике.



Фиг. 1



Ф и г. 2



Ф и г. 3

Из фиг. 1, 2 видно, что профили во флегматизированных ВВ имеют особенность — горизонтальный участок в начальной стадии. Как показали специально поставленные опыты, длительность «плато», за которым следует отстающая от фронта разгрузка, растет с увеличением длины заряда и составляет в гексогене около 1 мкс для $L = 120$ мм.

В таблице для двух взрывчатых составов последовательно приведены начальные плотности ρ , скорости детонации D , экспериментальные давления «плато» в продуктах взрыва (ПВ) внутри заряда, а также на границах с преградами из меди, алюминия, плексигласа (пл.) и этанола (эт.). В знаменателе для величин экспериментальных давлений указано количество опытов, по которым проводилось усреднение.

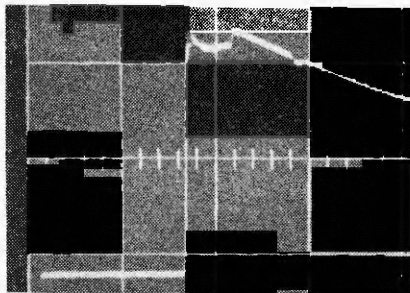
По результатам экспериментов с датчиками внутри зарядов и на границах с преградами различной жесткости для каждого ВВ на диаграмме давление p — массовая скорость u строились ветви торможения и расширения ПВ. Давление детонации p^* в последней колонке таблицы определялось по точке пересечения этих кривых с детонационным лучом $p = \rho Du$. В этой же колонке в скобках даны литературные сведения относительно чистых взрывчатых веществ.

Из таблицы видно, что небольшое количество флегматизатора (6%) существенно снижает детонационное давление. В то же время скорость детонации не уменьшается и даже несколько возрастает. Так, для гексогена D увеличивается за счет добавок с 8,23 км/с [8] на 0,15 км/с и для тэна с 7,93 км/с [6] примерно на 0,2 км/с.

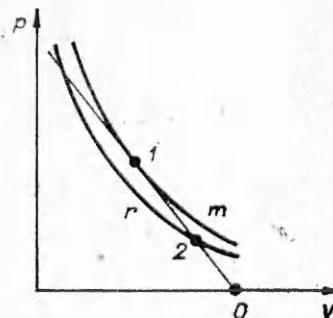
Эти факты, а также аномальная форма профилей $p(t)$, имеющих «плато», показывают, что детонация флегматизированных ВВ протекает в недосжатом режиме [9].

Подтверждение такой интерпретации дали опыты, в которых в заряды из флегматизированного гексогена вводились мощные треугольные импульсы с начальной амплитудой порядка 30 ГПа. Если стационарная детонация для исследуемого ВВ реализуется в недосжатом режиме, то на определенной стадии затухания, согласно [10], должен произойти распад разрыва на фронт детонации и распространяющуюся за ним с меньшей скоростью ударную волну сжатия. Образование двухволновой конфигурации связано со сверхзвуковым течением ПВ, когда возмущение любого знака не догоняет фронта недосжатой детонации.

Состав	ρ , г/см ³	D , км/с	Экспериментальное давление, ГПа					p^* , ГПа
			$p_{ПВ}$	p_{Cu}	p_{Al}	$p_{пл}$	$p_{эт}$	
Гексоген + до- бавка, 94,3/5,7	1,66	8,38	$\frac{26,0}{4}$	$\frac{4,23}{3}$	$\frac{3,15}{3}$	$\frac{19,9}{8}$	$\frac{15,45}{3}$	$\frac{26,8}{(28,6[10]-30,3[8])}$
тэн + добавка 94,2/5,8	1,655	8,11	$\frac{23,4}{3}$	$\frac{36,0}{2}$	$\frac{28,0}{4}$	$\frac{18,1}{2}$	$\frac{13,9}{4}$	$\frac{23,9}{(28,4 [6])}$



Ф и г. 4



Ф и г. 5

На фиг. 4 приводится осциллограмма давления, записанная манганиновым датчиком на границе заряда плотностью $1,62 \text{ г/см}^3$, длиной 165 мм и диаметром 84 мм с фторопластовой преградой. Начальное пересечение создавалось с помощью шайки мощного ВВ высотой 60 мм . На осциллограмме, масштаб времени которой 1 мкс/дел , заметны описанные выше особенности: «плато» продолжительностью $0,5 \text{ мкс}$ с давлением $23,2 \text{ ГПа}$ (что соответствует давлению детонации $26,8 \text{ ГПа}$ при плотности $1,66 \text{ г/см}^3$) и второй разрыв, увеличивающий давление до $25,1 \text{ ГПа}$. Передний пик на осциллограмме продолжительностью $0,15 \text{ мкс}$ относится к переходным процессам в измерительной линии и изоляции датчика. Подобный профиль давления стабильно фиксировался при длине заряда, начиная со 100 мм .

В литературе описаны различные условия, приводящие к недосжатой детонации в твердых взрывчатых веществах. Принудительно высокая скорость фронта реакции реализуется за счет опережающего инициирования в сильно пористых ВВ или в смесях, содержащих частицы тяжелых металлов [11]. Другой механизм возможен в системах с немонотонным энерговыделением [10, 12]. В последнем случае скорость детонации определяется (фиг. 5) наклоном касательной $0-1$ к адиабате (кривая m), отвечающей максимуму тепловыделения, а давление — точкой 2 пересечения этой прямой с адиабатой конечных продуктов взрыва (кривая r).

Экспериментально недосжатая детонация второго типа в конденсированных взрывчатых составах ранее не наблюдалась. В изучавшихся флегматизированных ВВ в качестве добавок используются высокомолекулярные соединения парафинового ряда. Адиабаты m максимального тепловыделения представляют здесь аддитивные адиабаты этих соединений и ПВ, параметры которых, близкие к чистым ВВ, приводят к небольшому повышению скорости детонации. Переход к конечному составу и состоянию 2 происходит в результате эндотермических процессов деструкции молекул примеси на более простые соединения.

Как показывают оценки, полученные экспериментальные характеристики детонационного режима во флегматизированном тэне реализуются при снижении адиабаты конечных продуктов по оси давлений всего на несколько килобар за счет энергетических затрат на разложение в $50-60 \text{ кал/г}$. Отметим, что энергия, необходимая для полного разложения содержащегося в смеси с тэном количества парафинов на простые вещества (углерод и водород), составляет $120-130 \text{ кал/г}$.

Поступила 26 XII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Апин А. Я., Димза Г. В. О детонации наполненных и смешанных ВВ. — В сб.: Взрывное дело. М.: Недра, 1974, № 74/31.
2. Котомин А. А., Петров Н. В., Гидаспов Б. В. Детонация взрывчатых веществ с инертными добавками. — В сб.: Горение и взрыв (Материалы IV Всесоюз. симп. по горению и взрыву). М.: Наука, 1977.

3. Кузнецов В. М., Матвеев Ф. И. О детонации смеси ВВ с полистиролом.— ФГВ, 1977, № 6.
4. Кривченко А. А., Шведов К. К. и др. Исследование детонационных характеристик систем гексоген — наполнитель.— ФГВ, 1972, № 4.
5. Persson A., Persson P.-A. Measurements of detonation pressures in condensed explosives at low and high initial densities.— In: Proc. of Symp. High Dynamic Pressure. Paris. 1967.
6. Horning H. C., Lee E. L., Finger M., Kyrrle T. E. Equation of state of detonation products.— In: Proc. of 5th Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1970.
7. Канель Г. И. Применение манганиновых датчиков для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, отд. научных фондов, № 477—74 Деп. 1974.
8. Воскобойников И. М., Киришин А. Н., Афанасенков А. Н., Воскобойникова И. Ф. Два новых способа измерения динамических давлений.— В кн.: Доклады I Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1974.
9. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
10. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
11. Альтшулер Л. В., Рязанов В. Т., Сперанская М. П. Влияние тяжелых примесей на режимы детонации конденсированных ВВ.— ПМТФ, 1972, № 1.
12. Кузнецов Н. М. К неоднозначности и устойчивости детонационного режима.— ЖЭТФ, 1967, т. 52, вып. 1.

УДК 534.222.2

ЭФФЕКТЫ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ И ВЛИЯНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ НА УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОРИСТЫХ ТЕЛ

С. З. Дунин, В. В. Сурков

(Москва)

Ударные волны — явление, связанное не только с возможностью разрушительного действия, но используемое в чисто конструктивном аспекте: прессование материалов, сварка, восстановление термодинамических параметров конденсированных веществ [1], конструирование материалов с данной степенью пористости, использование пористых материалов как амортизатора ударной волны [2].

Боле разработаны вопросы, связанные с распространением интенсивных ударных волн (давления больше 50 ГПа) в пористых телах [1]. Явления же в ударных волнах интенсивности от 0,1 ГПа до десятков гигапаскалей пока еще изучены не столь детально. В частности, не исследованы вопросы механизма диссипации энергии при ударном сжатии пористых тел в этом диапазоне давлений.

Эксперименты с пористыми образцами [3, 4] показывают: вязкопластическое течение вещества в ударной волне наиболее интенсивно протекает в окрестности сильных неоднородностей. Локальные температуры в этих областях заметно превосходят среднюю температуру в ударной волне. Аналогичные эффекты наблюдаются при взрывном обжатии цилиндрических оболочек, где происходило плавление и испарение внутренних поверхностей оболочек [5].

В данной работе выводится распределение внутренней энергии в окрестности неоднородности и на основе этого распределения анализируется характер кумуляции энергии и эффекты плавления при ударном сжатии пористых тел. Исследуется влияние теплового расширения вещества и изучается поведение аномальных адиабат пористых сред в диапазоне давлений, сравнимых с прочностью вещества. Рассматриваются вопросы о структуре ударного фронта, анализируется зависимость объема расплава от амплитуды волны.

Рассмотрим ударные волны, амплитуда которых мала по сравнению со сжимаемостью твердого тела K ($K \sim 50$ ГПа), но достаточно велика, чтобы в окрестностях пор возникло вязкопластическое течение. В этом диапазоне давлений ширина ударного фронта много больше размеров неоднородностей [6], причем твердое тело можно считать несжимаемым, так как плотность среды изменяется в основном за счет пластического затекания пор. Исследуем поведение вещества с порами на основе модели сферических ячеек [6]. Объемные деформации ячеек характеризуются изменением макроскопического параметра пористости α , равного отношению полного объема среды к объему твердого тела. В данной модели $\alpha = b^3/(b^3 - a^3)$, где b и a — текущие радиусы ячейки и поры. Сферическое