

тройке динамическим методом. II. Определение скорости звука и обобщенной кинетической характеристики. // ФГВ, 1987, т. 23, № 1, с. 14-22.

7. А.Н. Дремин. Современные проблемы исследования детонации в конденсированных средах. Науч. тр. Института механики МГУ, 1973, № 21, с. 150-157.
8. В.С. Трофимов. О возможности ускорения реакции и диффузии в ударном фронте детонации. - В сб.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черногоровка, 1978, с.11-16.
9. К.М. Михайлюк, В.С. Трофимов. О возможном газодинамическом пределе распространения стационарной детонации // ФГВ, 1977, т. 13, № 4, с. 606-613.

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА СОСТАВА НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА

© С.Н. Любятинский, Г.В. Коваленко, В.Ф. Куропатенко, В.Г. Лобойко

Для численного моделирования взрывных устройств необходимо знать уравнения состояния (УРС) продуктов взрыва (ПВ) взрывчатого вещества (ВВ), которое должно воспроизводить в расчетах следующие характеристики ВВ: скорость детонации; параметры Жуге; изэнтропу расширения ПВ из состояния Жуге, определяющую метательные характеристики ВВ; кривизну изэнтропы ПВ в точке Жуге или  $d^2P_s/d\rho^2$ , определяющую градиент давления за фронтом детонации.

В работе [1] было предложено достаточно простое универсальное уравнение состояния ПВ:

$$P = A * \rho_{ок} * D_K^2 * (\rho / \rho_{ок} - \delta_*)^m + (\gamma - 1) * \rho * E, \quad (1)$$

в котором любое ВВ характеризуется всего двумя параметрами:  $\rho_{ок}$  - предельной плотностью и  $D_K$  - предельной скоростью детонации. Коэффициенты  $A=0,1533$ ,  $\delta_*=0,35$ ,  $m=2,284$ ,  $\gamma=f(\rho/\rho_{ок})$  ( $\gamma=1,6667$  при  $\rho > \delta_* * \rho_{ок}$ ) едины для всех ВВ. Точка Жуге определяется выражением для скорости детонации

$$D = D_K (\rho_0 / \rho_{ок})^\alpha, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  - плотность ВВ, коэффициент  $\alpha=0,7$ .

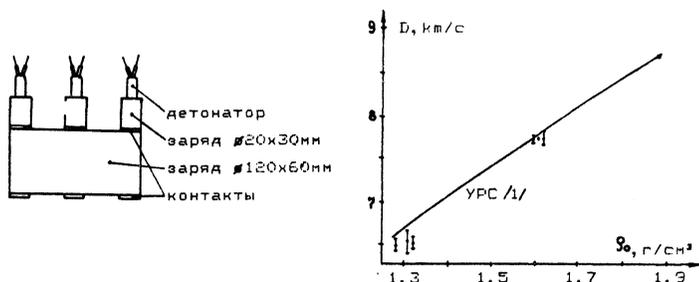


Рис. 1. Определение скорости детонации как функции плотности ВВ

Целью нашей работы была экспериментальная проверка применимости данного уравнения состояния к ВВ-1 (типичному составу на основе октогена), исходя из упомянутых выше критериев.

Определение скорости детонации проводилось при помощи экспериментального узла, показанного на рис.1, и электроконтактной методики измерения временных интервалов.

Диск  $\varnothing 120 \times 60$  мм инициировался одновременно в семи точках (в центре и в шести точках по окружности  $\varnothing 100$  мм) при помощи дополнительных зарядов  $\varnothing 20 \times 30$  мм, имеющих ту же плотность, что и основной. Это позволяло определять не только среднее значение скорости детонации, но и разноточность использованных зарядов, которая в дальнейшем учитывалась при определении параметров Жуге низкоплотных зарядов. Электрические контакты состояли из двух полосок алюминиевой фольги толщиной 0,02 мм, разделенных лавсановой пленкой толщиной 0,02 мм, что исключало влияние их смещения на результаты измерений. Из рис.1 видно, что УРС [1], воспроизводя скорость детонации при плотности  $\rho_0 = 1,88 \text{ г/см}^3$ , занижает  $dD/d\rho_0$  на  $\sim 7\%$ .

Давление Жуге ВВ-1 определялось путем измерения скорости ударной волны в алюминиевой (сплав АМЦ,  $\rho_{Al} = 2,73 \text{ г/см}^3$ ) преграде, контактирующей с зарядом ВВ. При этом использовались метод  $P-U$  диаграмм,  $D-U$  соотношение для алюминия [2]

$$D_{Al} = 5,231 + 1,485 * U_{Al} - 0,024 * U_{Al}^2 \text{ (км/с)}, \quad (3)$$

и политропическое приближение для ПВ

$$P = P_j * (\rho / \rho_j)^n, \quad (4)$$

где  $P_j$  и  $\rho_j$  — давление и плотность Жуге,  $n = d(\ln P_s) / d(\ln \rho)$  — показатель политропы. Основная особенность экспериментального узла, показанного на рис.2, заключалась в том, что преграда была выполнена в виде набора 10-миллиметровых алюминиевых дисков (первый диск — 3 мм), разделенных лавсановыми пленками толщиной 0,04 мм. Момент электрического пробоя каждой пленки в ударной волне регистрировался при помощи электроконтактной методики.

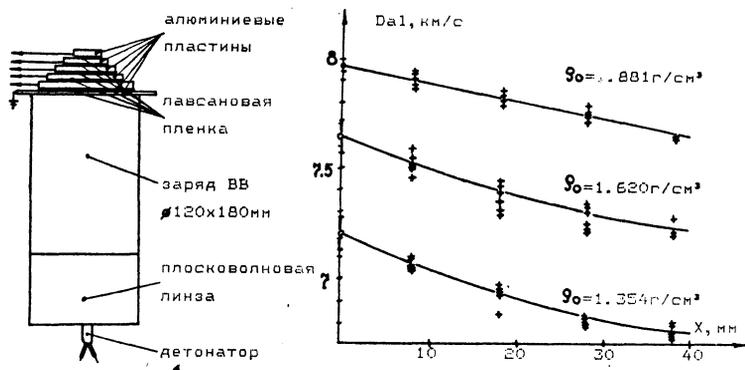


Рис.2. Определение скорости ударной волны в алюминиевой преграде как функции плотности ВВ

При этом регистрация распространения ударной волны в преграде осуществлялась по опережающему участку ее фронта, что исключало влияние искрив-

ления фронта на результаты измерений. Последнее обстоятельство имеет особо важное значение при исследовании низкоплотных зарядов имеющих значительную (до  $0,1 \text{ г/см}^3$ ) разнородность.

Экспериментальные значения скоростей ударных волн в алюминиевых пластинах и аппроксимирующие их кривые приведены на рис.2. Экстраполированные к  $x=0$  значения  $D_{AP}$  и соответствующие им значения  $P_j$  приведены на графиках рис.3.

Из рис.3 видно, что УРС [1] воспроизводит  $P_j$  при  $\rho_0=1,881 \text{ г/см}^3$  и завышает  $dP_j/d\rho_0$  на 20%, что соответствует завышению градиента за фронтом плоской детонационной волны  $\sim 20\%$ . Отметим также, что полученная зависимость  $P_j(\rho_0)$  достаточно хорошо описывается зависимостью  $P_j \sim \rho_0^2$ , предложенной Камлетом [3].

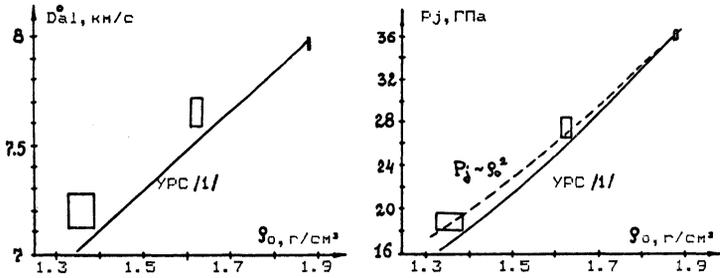


Рис. 3. Зависимость начальной скорости ударной волны в алюминии и давления Жуге от плотности ВВ

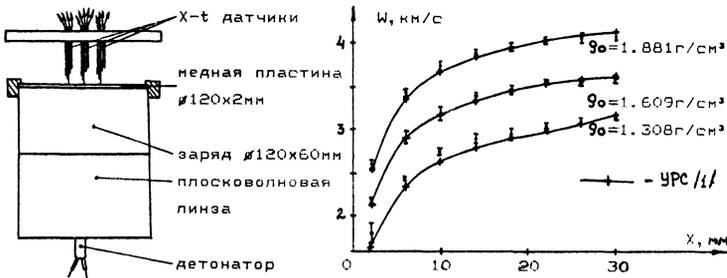


Рис. 4. Определение скорости полета пластины как функции плотности ВВ и расстояния

В экспериментах, описанных выше, мы исследовали УРС ПВ в области относительно высоких давлений ( $P \sim 10 \text{ ГПа}$ ), измерение скоростей полета пластин, метаемых зарядами ВВ различной плотности, и сравнение их с расчетными позволяет проконтролировать энтропию расширения ПВ в области давлений до  $1 \text{ ГПа}$ .

Плосковолновая линза с 15-миллиметровой свинцовой проставкой обеспечивала практически мгновенное инициирование заряда. Скорость полета пластины измерялась при помощи трех электроконтактных жатчиков, аналогичных описанным в работе [4]. Каждый датчик состоял из девяти медных проволочек ПЭВ-2  $\varnothing 0,15 \text{ мм}$ , наклеенных на трубку  $\varnothing 6 \text{ мм}$  из конденсаторной бумаги. Поскольку полученные на трех различных датчиках  $X-t$  диаграммы движения пластины не отличались друг от друга, они обрабатывались совместно. Средние значения скорости пластины для каждой базы ее измерения приведены на

рис.4, где также приведены результаты численного моделирования по комплексу программ ВОЛНА [5] с использованием УРС [1]. Линза в расчетах моделировалась 15-миллиметровой свинцовой пластиной, летящей со скоростью 1,03 км/с (скорость свободной поверхности проставки). Влияние ее в расчетах проявилось только для плотности ВВ 1,308 г/см<sup>3</sup> и выразилось в увеличении скорости пластины до 3% на последних базах.

Из рис.4 видно, что расхождение между экспериментальными и расчетными скоростями пластины не превышает 1% для плотностей ВВ 1,881 г/см<sup>3</sup> и 1,609 г/см<sup>3</sup> и 3% для плотности ВВ 1,308 г/см<sup>3</sup> при экспериментальной погрешности 1%.

Таким образом, УРС [1] достаточно хорошо описывает взрывчатые характеристики ВВ-1 при плотности  $\rho_0 \sim 1,88 \text{ г/см}^3$  и несколько хуже их зависимости от плотности. Полученные экспериментальные данные могут быть также использованы для разработки нового, более совершенного уравнения состояния ПВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Ф. Куропатенко. Уравнения состояния продуктов детонации плотных ВВ // ФГВ, 1989, т. 25, № 6, с. 112-117.
2. Ю.Н. Жугин, К.К. Крупников, Н.А. Овечкин и др. О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца в смесях с парафином и фторопластом // III Забалахинские научные чтения, Кыштым, 1992.
3. V.J. Kamlet, S.J. Jacobs. Chemistry of detonation; simple method for calculating detonation properties of C-H-N-O explosives // J. Chem. Phys., 48, 1968, 23.
4. Н.И. Куракин, В.В. Даниленко, Н.П. Козерук. Электроконтактная методика регистрации  $X,t$  - диаграмм // ФГВ, 1989, т. 25, № 5, с.89-92.
5. В.Ф. Куропатенко, Г.В. Коваленко, В.И. Кузнецова и др. Комплекс программ ВОЛНА и неолнородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. вып. 2, М. 1989, с. 9-25.

## ПАМЯТКА ПО КОМПЬЮТЕРНОМУ НАБОРУ

В настоящее время журнал "Математическое моделирование" дополнительно к рукописям статей, оформленным в соответствии с требованиями журнала, принимает и файлы с текстами статей, набранными в текстовом редакторе ChiWriter (версии 3.xx). Такие статьи будут публиковаться в первую очередь (разумеется, в случае одобрения их редколлегией). Соответствие набора приведенным ниже требованиям, будет ублажать прохождение статей.

Авторы могут передать файлы либо непосредственно в Редакции, либо по E-mail /journal@imamod.msk.su/. При получении по E-mail файла со статьей Редакция будет высылать также по E-mail подтверждение о приеме.

Возможна и пересылка дискет по почте, однако в настоящее время это не желательно, так как Редакция не готова взять на себя все заботы, связанные с сохранностью дискет при пересылке обратно автору.

В случае, когда Автор не использует текстовый редактор ChiWriter для набора своих статей, Редакция примет чистый ASCII-файл, содержащий текст без формул.