

14. G. P. Glass, G. B. Kistiakowsky e. a. J. Chem. Phys., 1965, 42, 2.
15. R. A. Strehlow, R. E. Maurer, S. Rajan. AIAA J., 1965, 7, 2.
16. A. Burgat, A. Lifshitz e. a. 13-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1971.
17. Р. Киэпп, Дж. Дэйли, Ф. Хэммит. Кавитация. М.: Мир, 1974.
18. W. Lauterborn.— In: Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics/ W. Lauterborn: Springer — Verlag: Berlin Heidelberg. N. Y., 1980.
19. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко и др. Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, 4, 51.
20. В. С. Тесленко. ПМТФ, 1976, 4, 109.

*Поступила в редакцию 4/VIII 1986,
после доработки — 23/I 1987*

ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ В ВОЛНЕ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ ПРЕССОВАННОГО ТЭНА

*В. Ф. Мартынюк, А. А. Сулимов, М. К. Сукоян, А. В. Обменин
(Москва)*

Стационарная низкоскоростная детонация (НСД) в прессованных ВВ наблюдалась лишь для зарядов, заключенных в оболочку. При этом о стационарности процесса судили по неизменности скорости распространения детонации и конечной деформации внутреннего канала оболочки после прохождения процесса [1]. Надежные данные о профиле давления НСД для зарядов в металлической оболочке по существу отсутствуют, что объясняется трудностью применения традиционных методик измерения давления в этих условиях. В данной работе исследована динамическая картина деформации стальной оболочки при распространении НСД в прессованном тэне плотностью $1,73 \text{ г/см}^3$. Заряд заключался в стальной оболочку с внутренним и внешним диаметрами 10 и 16 мм. Полученные данные позволили оценить профиль давления в волне НСД.

Осуществлялась покадровая (с помощью ждущей лупы времени ЖЛВ-2) съемка процесса расширения внешнего диаметра оболочки на фоне яркого экрана. Скорость съемки составляла 250 000 кадр/с. В зависимости от дисперсности тэна (применялся продукт с размером частиц 400—600 мкм) НСД распространялась со скоростью $u = 2300 \div 2600 \text{ м/с}$. НСД выходит на стационарный режим на расстоянии 40—50 мм от места поджога у закрытого торца и распространяется с постоянной скоростью на всю длину оболочки (200 мм). Стационарность профиля давления за фронтом волны подтверждается неизменностью характера разлета оболочки. На рис. 1 представлены фотографии расширения оболочки, причем фотографии, снятые через 20 мкс, наложены одна на другую. Видно начало расширения оболочки *A* и место прорыва продуктов детонации *B* вследствие потери оболочкой сплошности, которая возникает приблизительно при двукратном увеличении диаметра. При наличии радиальных отверстий в оболочке зафиксировано, что свечение, соответствующее реакции, с точностью, обеспечиваемой скважностью используемого прибора (время экспонирования 2 мкс), совпадает с началом расширения оболочки.

Полученные фотографии использованы для оценки давления в волне НСД. Действительно, из фотографий определяются значения внешнего диаметра оболочки в разных сечениях в различные моменты времени. Внутренний радиус оболочки R вычислялся по измеренным текущим значениям внешнего радиуса, исходя из предположения о несжимаемости материала оболочки. На рис. 2 для установившегося режима распространения НСД представлена зависимость изменения относительного внутреннего радиуса оболочки $(R - R_0)/R_0$ (R_0 — начальный внутренний радиус) от времени от начала ее расширения, определенная для сечений, отстоящих на 50, 60, 70, 80 и 90 мм от места поджигания

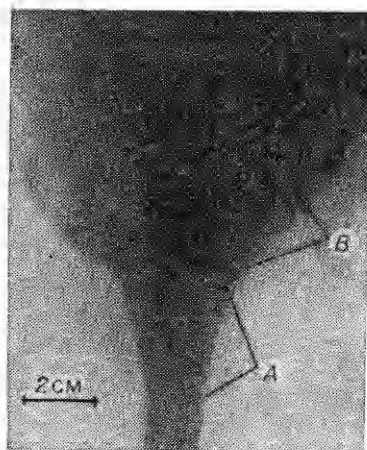


Рис. 1.

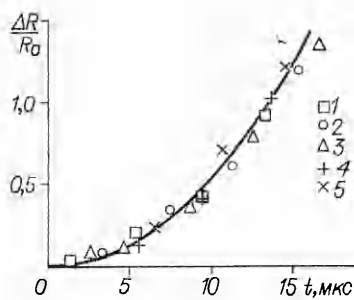


Рис. 2.

(точки 1—5). НСД распространялись с $u = 2600$ м/с. Видно, что экспериментальные данные имеют разброс. Сделана попытка поиска функции $z(t) = R(t)/R_0$ в виде степенного полинома

$$Z(t) = 1 + at + bt^2 + ct^3 + \dots$$

Анализ фотографий разлета оболочки показывает, что в начальный момент времени скорость оболочки равна нулю (отсутствие излома в точке А на рис. 1). Это приводит к условию $a = 0$. Использование полиномов с дробными степенями меньше двух ведет к бесконечным ускорениям в нулевой момент времени, что не соответствует наблюдаемой картине. Отсюда естественна попытка описать радиальный разлет выражением типа

$$Z(t) = 1 + bt^2 + ct^3.$$

Методом наименьших квадратов получено, что данные хорошо аппроксимируются единым выражением $Z(t) = bt^2$, где коэффициент $b = 0,0054$ мкс⁻² для НСД с $u = 2600$ м/с (кривая на рис. 2) и $0,0046$ мкс⁻² для НСД с $u = 2300$ м/с. Учет члена ct^3 приводит к увеличению ускорения оболочки на фронте на 10% и уменьшению на 20% ускорения к моменту ее разрушения. Учет более высоких степеней вызывает существенно меньшее изменение ускорения.

Для оценки давления в волне НСД воспользуемся уравнением радиального разлета тонкой оболочки, которое в эйлеровых координатах имеет вид

$$1/Z \cdot d^2Z/dt^2 = (p - p_s) / [R_0 \rho_{об} H_0 (1 + H_0/2R_0)],$$

где p — давление, действующее на оболочку; p_s — ее прочность; $\rho_{об}$ — плотность материала оболочки; H_0 — толщина стенки. Пренебрежение толщиной оболочки приводит к завышению расчетного давления, действующего на оболочку в начальной стадии, приблизительно в 1,5 раза. Кроме того, к завышению давления приводит при расчете пренебрежение неоднородностью разлета оболочки. Эта составляющая ошибки может достигать 20% на конечной стадии. Подставляя выражение $Z(t) = 1 + bt^2$ в уравнение разлета оболочки, получим зависимость действующего на оболочку давления от времени

$$p(t) = p_s + 2bR_0 \rho_{об} H_0 (1 + H_0/2R_0) / (1 + bt^2).$$

Рассматривая оболочку как идеальное жесткопластическое твердое тело, можно оценить ее прочность: $p_s = \sigma_{пр} \ln \left(\frac{R_0 + H_0}{R_0} \right) = 1,5$ кбар ($\sigma_{пр}$ — предел текучести материала оболочки). Наибольшую трудность при такой обработке составляет оценка давления на фронте волны. Однако полученные электромагнитным методом данные [2] показывают, что процессы, распространяющиеся со скоростями рассматриваемого диапазона, имеют четко выраженный ударный фронт и расщепление волны отсутствует. При этом амплитуда давления на фронте, с учетом возможной

погрешности определения в 1,5—2 раза, согласуется с данными, полученными при измерении ударной адиабаты тэна с $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$ [3], имеющими разброс такого же порядка величины. Давление на фронте волны составляет 18 кбар для НСД с $u = 2600 \text{ м/с}$ (расчеты завышают действительное значение давления), оно близко к критическому давлению инициирования нормальной детонации в тэне с $\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$ [4]. Проведена также оценка пространственного распределения давления, получено, что на расстояниях 13, 26 и 39 мм от переднего фронта действующее на оболочку давление составляло 16, 12 и 8 кбар соответственно. Следует отметить, что полученный расчетный профиль давления характеризуется относительно медленным спадом по сравнению с профилями давления, полученными в насыпных зарядах ВВ [5, 6]. При распространении преддетонационного процесса с характерной для НСД скоростью в заряде без оболочки литого тротила, обладающего малой удельной поверхностью, наблюдался аналогичный полученному в данной работе профиль давления (при распространении процесса на большие расстояния профиль массовой скорости с отсутствием спада оставался неизменным и переход в детонацию отмечался на расстоянии 120 мм) [7]. В данной работе наличие разрушающейся оболочки при малых диаметрах заряда обеспечивает отсутствие сильных вторичных волн, могущих привести к возникновению нормальной детонации.

Полученная динамическая картина деформации стальной оболочки может быть использована для расчета степени выгорания ВВ в волне НСД.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Обменин, В. А. Балыков, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1970, 5, 4, 571.
2. А. А. Сулимов, А. В. Обменин, А. И. Коротков и др.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
3. D. Stirpe, J. O. Johnson, J. Wackerly. J. Appl. Phys., 1970, 41, 9, 3884.
4. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
5. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Взрывное дело, № 63/20. М.: Недра, 1967.
6. К. К. Шведов, С. А. Колдунов, А. Н. Дремни. ФГВ, 1973, 9, 3, 424.
7. А. Н. Дремни, С. А. Колдунов. Взрывное дело, № 63/20. М.: Недра, 1967.

*Поступила в редакцию 20/XII 1983,
после доработки — 13/X 1986*

ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ДОБАВКИ НА СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕВЫХ ЗАРЯДОВ

И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя, Г. В. Димза

(Москва)

Параметры детонации взрывчатых веществ снижаются при введении в заряды инертных добавок из-за сжатия, разгона и прогрева частиц добавок. Характерные времена завершения этих процессов различны, возрастают в порядке перечисления, и подбором дисперсности компонентов заряда можно реализовать ситуацию, когда за времена разложения ВВ в детонационной волне (ДВ) частицы добавки будут сжаты и вовлечены в поток продуктов взрыва, но практически не прогреваются. При этом снижение параметров детонации определяется только сжимаемостью материала добавки, информацию об особенностях изменения которой с давлением можно получить из анализа снижения параметров детонации зарядов одного ВВ разной плотности или зарядов разных веществ близкой плотности. Ниже сказанное иллюстрируется на примере сравнения скоростей детонации зарядов тротила, октогена и гексогена, содержащих хлористые натрий и калий, нитрид бора, алюминий, тальк, бензол, гексан и раствор CCl_4 и гексана с плотностью бензола. Размеры частиц добавок и ВВ 10—50 мкм и не варьировались для каждой из смесей.