

**ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ
НА СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ
ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С ГЕКСОГЕНОМ**

Л. Н. Акимова, А. Я. Апин
(Москва)

Влияние свойств оболочки на возможность и скорость распространения детонации проявляется в том случае, когда диаметр заряда меньше предельного. Принято считать, что оболочка ограничивает проникновение боковых волн разрежения в зону реакции и тем самым способствует более полному использованию энергии химической реакции в детонационной волне. Действие оболочки определяется сопротивлением, которое оказывает оболочка расширяющимся газообразным продуктам взрыва. Это сопротивление может определяться динамическими свойствами оболочки, прочностью оболочки, а также инерционными силами, которые должны зависеть от массы оболочки. Ответ на вопрос, какой из этих факторов играет основную роль, могут дать только опытные данные. Обратимся к литературным источникам. Сведения, имеющиеся в литературе по вопросу влияния оболочки на скорость детонации ВВ, носят разноречивый характер. Этому способствуют, видимо, противоречивые экспериментальные данные. Так, по данным работы [1], свинцовая оболочка оказывается более эффективной по сравнению с железной, а в работе [2], наоборот, железная оболочка увеличивает скорость детонации больше, чем свинцовая.

А. Ф. Беляев [3], исследуя аммиачно-селитряные ВВ, установил, что при одинаковой массе взрывчатая и инертная оболочки дают одинаковый эффект по влиянию на устой-

Таблица 1
Скорость детонации смеси ПА/Г (39/61)

Плексиглас		Свинец		Медь		Железо	
толщина, мм	D, м/сек	толщина, мм	D, м/сек	толщина, мм	D, м/сек	толщина, мм	D, м/сек
Насыпной заряд ($\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$)							
1	—	1	—	1	5520	1	5680
3	5390	3	5530	3	5660	3	5850
5	5380	5	5640	5	5850	5	6000
				7	5860	7,5	6020
Прессованный заряд ($\rho = 1,76 \text{ г/см}^3$)							
1	7820	1	—	1	7900	1	8400
3	7860	—	—	3	8050	3	8480
5	7830	5	8080	5	8220	5	8590

Примечание. Чтобы толщина оболочки не препятствовала свечению заряда, отверстия раззенковывались. Для каждой толщины оболочки заряда было проведено по 5—7 опытов. Средняя ошибка измерения составляла всегда менее 1%.

чивость, скорость детонации и обжатие свинцовых столбиков. Однако, как указывает сам автор, это правило эквивалентности является лишь первым грубым приближением и в ряде случаев наблюдаются значительные отклонения от него.

Авторы [4] основным фактором, определяющим эффект оболочки, считают ее массу. Некоторые исследователи [2, 5] связывают влияние

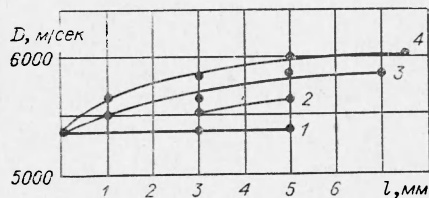


Рис. 1. Опыты с насыпным зарядом.
1 — плексиглас; 2 — свинец; 3 — медь; 4 — железо.

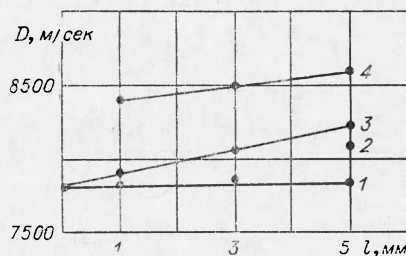


Рис. 2. Опыты с прессованным зарядом.
1 — плексиглас; 2 — свинец; 3 — медь; 4 — железо.

оболочки на скорость детонации ВВ со свойствами сжимаемости, причем и среди этих исследователей существуют противоречивые мнения: одни придают сжимаемости основное значение лишь на «толстых» оболочках, «тонким» же приписываются свойства инерционности. Как видно, этот вопрос не вполне ясен из-за отсутствия достаточного экспериментального материала и требует дополнительного исследования.

Выяснение основных факторов, определяющих влияние оболочки заряда на скорость детонации, было проведено на смеси перхлората аммония (ПА) с гексогеном. Поскольку реакции в смесевых ВВ протекают замедленно, можно ожидать, что эффект влияния оболочки на смесевые ВВ окажется более значительным. Были измерены скорости детонации смеси ПА с гексогеном при плотностях заряда: 1,1 и 1,76 г/см³



Рис. 3. Детонация заряда ВВ ($\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$) в свинцовой оболочке толщиной 3 мм.

(табл. 1). Диаметр зарядов насыпной плотности составлял 10 мм, прессованных — 20 мм. В опытах были использованы оболочки из плексигласа, свинца, меди и железа. Толщина оболочек составляла 1,3, 5,6 и 7,5 мм. Скорость детонации измерялась фотографическим методом. В непрозрачных оболочках для фотографирования процесса детонации были просверлены отверстия диаметром 1,5 мм на расстоянии 15—20 мм друг от друга (рис. 1, 2).

Записи, полученные на фоторегистре, представлены на рис. 3. Опытные данные показывают, что наибольшее влияние на скорость детонации при прочих равных условиях оказывает железная оболочка, затем идет медная, свинцовая и, наконец, плексиглас, причем наблюдается значительная зависимость скорости детонации от толщины оболочки. Наличие оболочки затрудняет расширение продуктов взрыва. Об этом свидетельствуют многочисленные фотографии кривизны фронта волны в свободном заряде и в заряде с оболочкой: волна детонационного фронта в заряде с оболочкой близка к плоской волне, что свидетельствует о торможении радиального расширения продуктов взрыва [6]. Представим геометрию процесса детонации заряда ВВ в оболочке, как показано на рис. 4. Будем считать, что расширение обуславливается ударной волной, распространяющейся под действием детонационного фронта. Расчет углов расширения оболочек (β) и углов, под которыми распространяется фронт ударной волны в оболочке (α), производился по методу, описанному в работе [5] и использованному в работе [7]. По этому методу угол α определяется:

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{n+1} \left(\frac{V_{0,об}}{V_0} \right) \frac{p_{об}}{p_1} \left(\frac{1}{1 - \frac{V_{0,об}}{V_0}} \right), \quad (1)$$

где n — показатель политропы продуктов взрыва; p_1 — давление во фронте детонации; V — удельный объем.

Ударные адиабаты использованных материалов следующие:

$$D_{Fe} = 3,8 + 1,58 U \quad [8],$$

$$D_{Cu} = 3,96 + 1,50 U \quad [9],$$

$$D_{Pb} = 2,03 + 1,52 U \quad [9],$$

$$D_{плекс} = 2,6 + 1,40 U.$$

Вообще говоря, выбор железа в качестве оболочки не совсем удачен, поскольку при ~ 130 кбар этот материал претерпевает полиморфное превращение. Однако расчет давлений в оболочке показывает, что при использовании зарядов высокой плотности в железе развивается давление ~ 300 кбар. Это позволяет использовать ударную адиабату железа в виде [8].

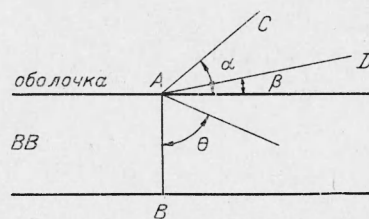


Рис. 4. Геометрия процесса детонации заряда ВВ в оболочке. АВ — фронт детонационной волны; АС — фронт ударной волны в оболочке; АД — граница расширения оболочки.

При использовании зарядов насыпной плотности, давление в железе ~ 100 кбар, т. е. лежит в неисследованной области ниже фазового перехода. Поскольку изменение плотности и динамической жесткости при фазовом переходе невелико, то возможно экстраполировать в эту область верхнюю ветвь ударной адиабаты железа. Обоснованность такой экстраполяции подтверждается закономерностями, полученными при расчете углов расширения оболочек для зарядов высокой и низкой плотности. Показатель политропы продуктов взрыва принят равным 3.

Предположим, что характер течения продуктов взрыва за фронтом детонационной волны во внешних слоях подчиняется решениям Прандтля — Майера (ПМ), а внутри угла θ давление постоянно. Давление вдоль тока линий Прандтля — Майера и угол расширения линий тока описываются уравнениями:

$$\frac{p_{\text{ПМ}}}{p_1} = \left[\cos \left(\sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \theta \right) \right]^{2n-1}, \quad (2)$$

$$\text{tg}(\alpha - \beta) = \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} \text{tg} \left(\sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \theta \right). \quad (3)$$

Задавая угол θ , находим по (2) $p_{\text{ПМ}}$ и далее из уравнения (3) определяем β . Согласно работе [5], на границе расширения оболочки сохраняется равенство нормальных компонент скоростей и давлений:

$$D \sin \beta = U_{06} \cos(\alpha - \beta). \quad (4)$$

Вместе с условием на фронте ударной волны

$$\frac{U_{06}}{D_{06}} = 1 - \frac{V_{06}}{V_{006}} \quad (5)$$

(4) дает

$$\frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg} \alpha} = \frac{V_{06}}{V_{006}}. \quad (6)$$

Решая уравнения (1), (5) и (6), находим зависимость p_{06} от угла β . Далее строим графики зависимости p_{06} от угла β и $p_{\text{ПМ}}$ от угла β . Точка пересечения, соответствующая условию равенства давлений, и дает искомый угол расширения оболочки, зная который, находим α и параметры ударной волны $D_{06} = D \sin \alpha$ (табл. 2). Опыт показывает, что

Таблица 2

Параметры	Расчет параметров зарядов							
	Материал оболочки							
	железо*		медь*		свинец*		плексиглас*	
α	36°50'	42°30'	36°	45°	25°	32°	77°	—
β	2°	4°50'	1°40'	1°10'	2°55'	5°30'	7°50'	13°30'
D_{06} , м/сек	3600	5800	3440	5800	2380	4280	—	—
U_{06} , м/сек	330	820	240	670	—	—	—	—

* Первая графа — насыпной заряд, вторая — прессованный.

вычисленные углы β для разных материалов, за исключением плексигласа, очень близки между собой и не могут объяснить экспериментальных зависимостей скорости детонации от материала оболочки. Действительно, скорость детонации заряда ВВ в стальной оболочке при толщине стенок 5 мм на 370 м/сек выше скорости детонации заряда в медной оболочке и на 500 м/сек в свинцовой при той же толщине стенок (прессованные заряды).

Таков же характер зависимости скорости детонации от материала оболочки и для насыпных зарядов. Единственный вывод, который можно сделать на основании результатов расчета — это то, что расширение в плексигласовой оболочке (значительно большее, чем в других), оказывается достаточным, чтобы практически не влиять на скорость детонации (в описываемых условиях). Опыты показывают, что динамическая сжимаемость материала оболочки, в которую заключен заряд ВВ, оказывает существенное влияние на скорость детонации: чем меньше сжимаемость материала оболочки, тем выше при прочих равных условиях скорость детонации. Однако помимо влияния сжимаемости оболочки отчетливо проявляется роль ее прочности на разрыв. При близкой сжимаемости более эффективной оказывается та оболочка, материал которой обладает большей прочностью. Механическая прочность исследованных материалов представлена ниже:

Материал оболочки	Прочность, 10^9 дин/см ²
железо	2,9—4,5
медь	1,2—1,7
свинец	0,12—0,17

Так, железо и медь имеют очень близкие ударные адиабаты и углы расширения, однако скорость детонации заряда в железной оболочке превышает скорость детонации заряда в медной. Если учесть прочность этих материалов, то результаты опытов становятся понятными.

А. Ф. Беляев предполагал, что повышенный по сравнению с правилом эквивалентности эффект оболочек из железа, дюрала и жести так же объясняется их прочностью. Существенного влияния массы оболочки на скорость детонации в настоящих опытах не обнаружено. Это подтверждается результатами измерений скорости детонации заряда ВВ в свинцовой оболочке. Имея низкие прочностные характеристики, свинцовая оболочка оказывается и наименее эффективной из изученных по влиянию на скорость детонации ВВ (не считая плексигласа).

Действие оболочек на импульс взрыва может быть иным. Опыт показывает [7], что при определенных условиях наибольший импульс оказывается в ВВ, заключенных в свинцовую оболочку. Здесь проявляется влияние скорости распространения ударной волны в оболочке на скорость ее разлета: чем меньше $D_{об}$, тем позднее оболочка начинает ускоряться, тем более близкими поддерживаются давления и температура продуктов взрыва к их значениям в зоне химической реакции, тем больше импульс взрыва, т. е. импульс взрыва определяется не только спадом давления вблизи плоскости Чепмена — Жуге, но также и спадом давления на более поздних стадиях, который определяется движением оболочки.

Поступила в редакцию
29/III 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Kast Zeit des Schieb und Springst. 1913, 8, 135.
 2. I. L. Corp, A. R. Ybbelohde. Trans. Far. Soc., 1948, 44, 646.
 3. А. Ф. Беляев. Вопросы теории ВВ. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1947.
 4. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
 5. Eyring and ot. Chem. Rev., 1949, 45, 69.
 6. M. Cook, S. Horsley and ot. J. Appl. Phys., 1956, 27, 269.
 7. А. К. Парфенов, А. Я. Апин. Сб. «Взрывное дело», № 52/9, 1963.
 8. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др. ЖЭТФ, 1954, 34, 874.
 9. R. G. Mc Queen, S. P. Magch. J. Appl. Phys., 1960, 7, 1253.
-