

О МЕХАНИЗМЕ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. С. Трофимов

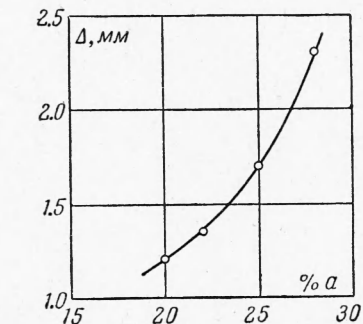
(Москва)

В работе [1] сделано предположение о том, что в конденсированных взрывчатых веществах (ВВ) ударный фронт детонационной волны, так же как и при детонации газов [2], может быть негладким. К. И. Щелкиным был получен критерий неустойчивости гладкого комплекса ударного фронта и зоны воспламенения во фронте детонационной волны

$$\frac{E}{RT_1} \left(i - \frac{T}{T_1} \right) \geq 1 \quad (1)$$

Здесь E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T_1 — температура за ударным фронтом детонационной волны, если бы он был гладким; T — температура изэнтропически расширившегося вещества от давления p_1 за ударным фронтом до давления p_2 в точке Жуге.

При выполнении критерия (1) на ударном фронте детонационной волны образуются косые ударные волны, в местах столкновения которых инициируется реакция. Для газообразной детонации в работах [2-3] была показана выполнимость критерия (1) и экспериментально доказано, что фронт детонационной волны является негладким.



Фиг. 1. Зависимость размера неоднородностей Δ от процентного содержания ацетона в НМ. Оболочка — стальная с внутренним диаметром 62 мм. Температура 8°C

В настоящей работе проверено, что критерий (1) выполняется для случая детонации жидкого ВВ — нитрометана (НМ) с начальной плотностью $\rho = 1.14 \text{ г/см}^3$. Это означает, что ударный фронт детонационной волны в НМ также является негладким. При вычислениях T_1 были использованы данные по ударной адиабате НМ [4] и зависимости теплоемкости НМ от температуры [5]. Полученное значение $T_1 = 2100^\circ \text{ К}$. Вместо величины T в критерий (1) подставлялась большая¹ величина $T' = T_1 v_1 / v$, где v_1 — удельный объем за ударным фронтом детонационной волны, v' — удельный объем на ударной адиабате, соответствующий давлению p_2 в точке Жуге [6]. Значение энергии активации бралось из работы [7].

В работах [8,9] получены фотографии распространения детонационной волны в НМ и его смесях с ацетоном, наблюдаемой при помощи скоростного фоторегистра в торец заряда (отношение НМ и ацетона будем обозначать через a по объему). Как показано в работе [8] в смесях НМ наблюдаются неоднородности свечения детонационного фронта. Это подтверждает высказанное представление о негладкой детонационной волне в этих смесях. Как показано в работе [3], в газах масштаб неоднородностей ударного фронта детонационной волны (в нашем случае расстояние между светлыми полосами на фотографиях [8]) пропорционален времени реакции, которое соответствовало бы гладкому детонационному фронту.

В настоящей работе измерялись скорость детонации и размер неоднородностей Δ на зарядах НМ и смесей НМ, длина которых доходила до 10 диаметров. Это значит, что все измеренные величины относятся к стационарной детонации. Как показали измерения, скорость детонации падает с увеличением концентрации ацетона в смеси. Это приводит, очевидно, к понижению температуры за ударным фронтом детонационной волны и росту времени реакции. В согласии с теорией [3] размер неоднородностей в этом случае действительно увеличивается (фиг. 1).

Использованная аппаратура не позволяла наблюдать неоднородности, размер которых меньше 1 мм, однако из фиг. 1 можно заключить, что размер неоднородностей в чистом НМ отличен от нуля. В самом деле, касательная к нижнему участку кривой на фиг. 1 идет в начало координат, а сама кривая, очевидно, должна пройти выше. Следует отметить, что размер неоднородностей зависит также от диаметра заряда (фиг. 2), но не зависит от толщины стальной оболочки, по крайней мере, в пределах толщин от 1 до 5 мм. Из фиг. 2 видно, что с увеличением диаметра заряда зависимость эта становится слабой и, по-видимому, Δ стремится к постоянному значению. Скорость детонации при этом не зависит от параметров оболочки.

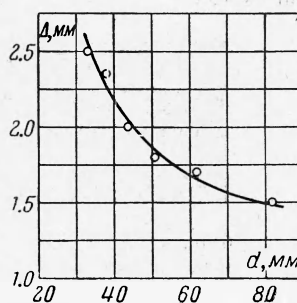
Если инициирование реакции обусловлено столкновением косых волн (неоднородностей) на ударном фронте детонационной волны, то распространение детонации долж-

¹ Уравнение изэнтропы для НМ в области 1000—2500° К имеет вид $Tv = \text{const}$.

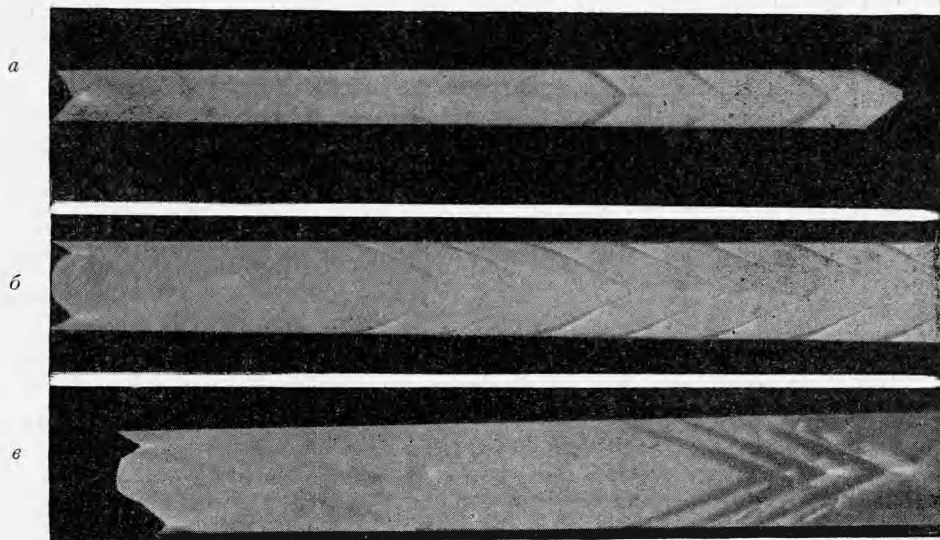
но определяться условиями, благоприятными или неблагоприятными для таких столкновений. Так, если по какой-либо причине одной из косых ударных волн не с чем взаимодействовать, то реакция в этом месте ударного фронта не возникнет, это приведет к последовательной гибели центров инициирования и образованию области (волны) отсутствия реакции, которую можно обнаружить на фоторазвертке процесса.

Такие области отсутствия реакции могут возникнуть самопроизвольно как в чистом НМ [9], так и в смесях НМ с ацетоном, но их можно также вызвать и искусственно. Для этого достаточно ухудшить условия столкновения косых волн со стенками сосуда, по которому идет детонация. На фиг. 3 приводятся фотографии распространения детонации по НМ и смесям НМ с ацетоном в стальных трубках, на внутренней поверхности которых сделаны кольцевые пазы. Как только детонационный фронт доходит до паза, согласно сказанному выше, образуется волна отсутствия реакции. Ширина таких волн определяется шириной паза, так как реакция вновь возникает при столкновении ударно-сжатого ВВ со следующим краем паза. По фотографиям, где отчетливо видны косые линии распространения неоднородностей, можно заключить, что передний край волны отсутствия реакции оставляет след, параллельный этим линиям и, следовательно, он распространяется со скоростью перемещения неоднородностей по ударному фронту.

Если детонация распространяется по металлической трубе, выходящей в широкий сосуд, то возникшие волны отсутствия реакции могут совершенно прекратить детонацию. Однако с увеличением диаметра трубы выше определенного (для каждой смеси НМ) затухающая детонационная волна переходит в расходящуюся (фиг. 4). Диаметр, при котором такой переход становится возможным, равен критическому диаметру распространения детонации по цилиндру из тонкой целлофановой оболочке. При диаметре меньше критического (d_*) детонация идет устойчиво только в металлических оболочках. Диаметр d_* сильно зависит от концентрации ацетона в смесях НМ: для чистого



Фиг. 2. Зависимость размера неоднородностей Δ от диаметра заряда для смеси НМ с ацетоном при $a = 75 : 25$. Оболочка стальная. Температура 8°C

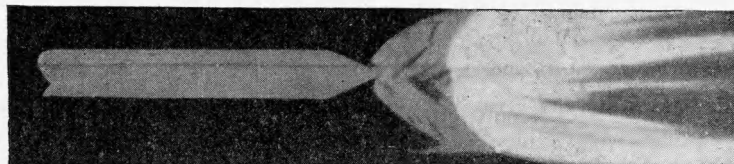


Фиг. 3. Фоторазвертка детонации в стальных оболочках с кольцевыми пазами: а) чистый НМ; диаметр заряда $d = 9.5$ мм. Размер паза $\delta = 1 \times 1$ мм, расстояние между пазами $l = 15$ мм; б) смесь при $a = 80 : 20$, $d = 50$ мм, $\delta = 2.5 \times 2.5$ мм, $l = 25$ мм; в) смесь при $a = 75 : 25$, $d = 50$ мм; $\delta = 2.5 \times 2.5$ мм, $l = 20$ мм

НМ он равен 18 мм, для смеси НМ — при $a = 92:8$ он равен 25 мм, для смеси при $a = 84:16$ он равен 90 мм. Экстраполяция этих данных до смеси при $a = 75 : 25$, когда отчетливо наблюдаются неоднородности, дает $d_* > 250$ мм. При приближении к такому диаметру снизу Δ становится постоянным (фиг. 2), а так как скорость детонации от диа-

метра не зависит, параметры детонации, по-видимому, достигают при d_* значений, соответствующих сколь угодно большому диаметру. Поэтому предложенный в настоящей работе метод определения d_* детонации жидких ВВ по переходу ее из узкой трубки в широкую имеет то преимущество перед другими методами, что полученный с его помощью d_* действительно является параметром вещества и не зависит от оболочки.

На фиг. 3 приведены фотографии распространения детонации по трубам с диаметром меньше d_* . Если детонация распространяется в трубе с диаметром больше d_* , то волны отсутствия реакции не достигают оси заряда, а максимальная глубина их проникновения в глубину заряда равна $1/2 d_*$.



Фиг. 4. Фоторазвертка распространения детонации в чистом НМ по латунной трубе с $d = 20$ мм, выходящей в широкий сосуд

Итак, детонационная волна в НМ и смесях НМ ведет себя одинаково. Аналогичная картина образования волн отсутствия реакции наблюдается также в смесях азотной кислоты с дихлорэтаном, нитроглицерина с метиловым спиртом и в расплавленном тротиле. Это указывает на то, что во всех этих ВВ инициирование реакции в детонационной волне происходит по одинаковому механизму, а именно в местах столкновения косых ударных волн на ударном фронте детонационной волны. Мы полагаем, что детонация во всех жидких ВВ протекает по указанному механизму, так как он обеспечивает более выгодный режим реакции.

Действительно, можно показать, что при сильной зависимости скорости реакции от температуры (например, при аррениусовской зависимости для $T \ll E/R$) заданное количество вещества прореагирует быстрее при таком режиме реакции, когда энергия прореагировавших молекул, идущая на инициирование следующих порций вещества, нагревает одновременно меньшее количество ВВ, но до более высокой температуры. Например, при одной и той же подведенной энергии термическое разложение ВВ, идущее гомогенно во всем объеме, обеспечивает меньшую скорость реакции, чем горение. Однако детонация, при которой обеспечивается еще большая концентрация энергии, идущей на инициирование, имеет еще большую скорость реакции. При этом гладкий детонационный фронт оказывается менее выгодным по сравнению с негладким, который обеспечивает концентрацию энергии, инициирующей реакцию, не только вдоль пути своего распространения, но и в поперечном направлении. Поэтому детонационная волна в жидких ВВ должна «выбирать» для своего распространения негладкий ударный фронт с инициированием реакции в местах столкновения неоднородностей, как более выгодный.

Авторы благодарят К. И. Щелкина и Я. К. Трошина за дискуссии, В. А. Пармонова и Г. Г. Немцева за помощь при проведении экспериментов.

Поступила 20 X 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкин К. И. Два случая неустойчивого горения. ЖЭТФ, 1959, т. 36, вып. 2.
2. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Пульсирующая и спиновая детонация газовых смесей в трубах. ДАН СССР, 1959, т. 125, № 1.
3. Волин Б. П., Трошин Я. К., Филатов Г. И., Щелкин К. И. О реакционно-кинетической природе неоднородностей в ударном фронте и роли их в процессе распространения газовой детонации, ПМТФ, 1960, № 2.
4. Илюхин В. С., Похил П. Ф., Розанов О. К., Шведова Н. С. Измерение ударных адиабат литого тротила, кристаллического гексогена и нитрометана. ДАН СССР, 1960, т. 131, № 4.
5. M a k o v k y A., L e p j i L. Nitromethane. Physical properties thermodynamics, Kinetics of decomposition, and utilization as fuel. Chem. Revs, 1958, vol. 58, No. 4.
6. Дремин А. Н., Похил П. Ф. Параметры детонационной волны тротила, гексогена, нитроглицерина и нитрометана. ДАН СССР, 1959, т. 128, № 5.
7. H i l l e n b r a n d L. J., K i l p a t r i k M. L. Thermal decomposition of nitromethane. J. Chem. Phys., 1951, vol. 19, N 3.
8. Дремин А. Н., Розанов О. К. О детонации смесей нитрометана с ацетоном. ДАН СССР, 1961, т. 139, № 1.
9. Дремин А. Н., Ададуров Г. А., Розанов О. К. О детонации нитрометана вблизи предела, ДАН СССР, 1960, т. 133, № 6.