

УДК 534.222.2

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА СМЕСЕЙ  
ОКИСЛИТЕЛЬ — ИНЕРТНОЕ ГОРЮЧЕЕМартынюк В. Ф., Сулимов А. А., Чамров В. А.,  
Дубовицкий В. Ф., Сукоян М. К.

Известно, что при детонации газов [1] и жидких ВВ [2] встречается как гладкий, так и негладкий детонационный фронт. Проведенные в последнее время исследования [3–5] показали, что негладкий фронт наблюдается при детонации гетерогенных и дисперсных ВВ. Однако имеющегося по гетерогенным ВВ экспериментального материала недостаточно, и он не находит объяснения с позиций существующих теорий.

В данной работе по следовой методике исследована структура детонационного фронта в модельных смесях окислитель — инертное горючее в широком интервале изменения плотностей зарядов и соотношения компонентов смеси. В области исследования структуры фронта проведены измерения скоростей детонации модельных смесей.

*Экспериментальная часть.* В работе использовали смеси ПХА — ПММА. Размер частиц ПХА составлял 50 мкм и ПММА 4 мкм. Исключение составляла стехиометрическая смесь, где размер частиц ПХА был 90 мкм. Характеристики используемых в работе смесей представлены в табл. 1. Здесь даны соотношения компонентов, стехиометрические коэффициенты  $\alpha$  и максимальные плотности  $\rho_{\max}$  смесей. В дальнейшем употребляются указанные в таблице номера смесей. В работе использовали заряды от насыпной плотности до относительной плотности  $\delta=0,85$  (здесь  $\delta$  — отношение плотности заряда к максимальной плотности смеси).

Таблица 1

Номер	ПХА/ПММА	$\alpha$	$\rho_{\max}$ , кг/м <sup>3</sup>	Номер	ПХА/ПММА	$\alpha$	$\rho_{\max}$ , кг/м <sup>3</sup>
1	85/15	1	1780	3	53/47	0,2	1490
2	74/26	0,5	1670	4	100/0	—	1950

Исследование структуры детонационного фронта по следовым отпечаткам предполагает изучение детонационных процессов в условиях прочной оболочки. Опыты с измерением скорости детонации проводили в стальных оболочках с внутренним и внешним диаметрами 15 и 50 мм соответственно и длиной 200 мм. Фоторегистрацию процесса осуществляли через отверстия в оболочке (диаметр отверстий 1 мм) ждущим фоторегистратором ЖФР-3. Для усиления свечения отверстия оболочки заполняли порошкообразным тэнотом. При исследовании структуры детонационного фронта применяли оболочки с внутренним диаметром 20 мм, канал которых до диаметра 15,5 мм заливался свинцом и обрабатывался разверткой. После опыта оболочки разрезали вдоль образующей и изучали следовой отпечаток на свинце.

*Результаты эксперимента.* Зависимость скорости детонации  $D$  от относительной плотности для модельных смесей и чистого ПХА представлена на рис. 1. Отметим наличие характерных участков на зависимостях  $D(\delta)$ . Как для чистого ПХА (рис. 1, кривая 4), так и для смесей с

ПММА скорость детонации увеличивается с ростом плотности до некоторого значения  $\delta_{D, \max}$ , а затем уменьшается. Такая зависимость характерна как для зарядов без оболочек, так и для зарядов в тонкостенных оболочках. При уменьшении стехиометрического коэффициента ниже единицы значение  $\delta_{D, \max}$  снижается. Обнаружен участок зависимости  $D(\delta)$ , в котором дальнейшее повышение плотности перестает влиять на величину скорости детонации, и в некотором диапазоне плотностей скорость детонации не зависит от плотности.

Это особенно четко проявляется для смесей, переобогащенных горючим. (Ранее в опытах по исследованию перехода горения в детонацию стехиометрической смеси ПХА — полистирол наблюдалась независимость

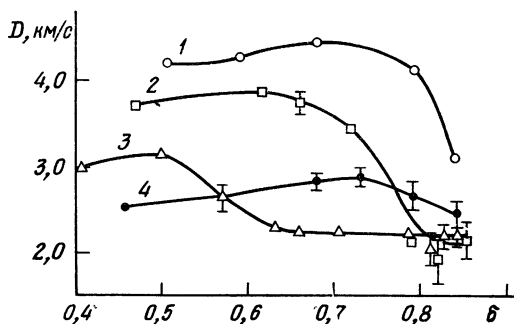


Рис. 1. Зависимость скорости детонации смесей от относительной плотности. Цифрами указаны номера смесей, соотношения компонентов в которых дано в табл. 1

скорости детонации от плотности в диапазоне  $\delta$  от 0,75 до 0,90 [6]; при этом скорость детонации  $\sim 1000\text{--}1200$  м/с, размер частиц компонентов  $\sim 15$  мкм.) Другой интересный результат состоит в том, что при высоких плотностях скорости детонации различных смесей практически совпадают со скоростью детонации чистого ПХА.

При исследовании структуры детонационного фронта эксперименты проводили вдоль всей кривой  $D(\delta)$ , т. е. при плотностях, соответствующих участкам роста, спада и постоянства скорости детонации при увеличении плотности. Характерные следовые отпечатки показаны на рис. 2, а размер  $r$  неоднородностей в табл. 2. Для чистого ПХА характерен гладкий следовой отпечаток, свидетельствующий об устойчивости детонационного фронта (эксперименты проводили с зарядами относительной плотности 0,77, 0,80 и 0,84). При введении горючего картина меняется. Если на участках роста скорости детонации ( $\delta=0,47$  для смеси 2 и  $\delta=0,44$  для смеси 3) следовой отпечаток указывает на гладкий детонационный фронт (рис. 2, а), то на участке уменьшения скорости детонации ( $\delta=0,66$  и 0,72 для смеси 2 и  $\delta=0,57, 0,63, 0,66$  и 0,71 для смеси 3) фронт явно неустойчивый (рис. 2, б, в). При этом размер неоднородностей увеличивается с уменьшением скорости детонации. На участке независимости скорости детонации от плотности ( $\delta=0,85$  для смеси 2 и  $\delta=0,79$  для смеси 3) отпечатки свидетельствуют о дальнейшем изменении структуры фронта в сторону увеличения ее устойчивости. На рис. 2, г видны лишь мелкие неоднородности на следовом отпечатке.

*Обсуждение результатов.* Полученные результаты можно объяснить с единых позиций на основании концепции о стадийном характере тепловыделения при детонации смесевых систем, когда первая стадия тепловыделения в детонационной волне связана с горением зерен ПХА, а вторая обусловлена диффузионным взаимодействием продуктов газификации горючего и окислителя. Действительно, в области роста скоро-

сти детонации наблюдаем гладкий детонационный фронт, что объясняется неразрывностью во времени двух стадий тепловыделения. Как показали измерения профилей массовой скорости [7], для детонации в этой области характерно малое время реакции ( $\sim 0,2$  мкс) и наличие четко выраженного химического пика в детонационной волне. В то же время скорость детонации зарядов в этой области близка к идеальной.

При увеличении плотности, когда скорость детонации уменьшается, реакции идут более медленно и время реакции увеличивается. Увеличение плотности приводит к уменьшению количества достаточно крупных пор в заряде, схлопывание которых обеспечивает необходимый для под-

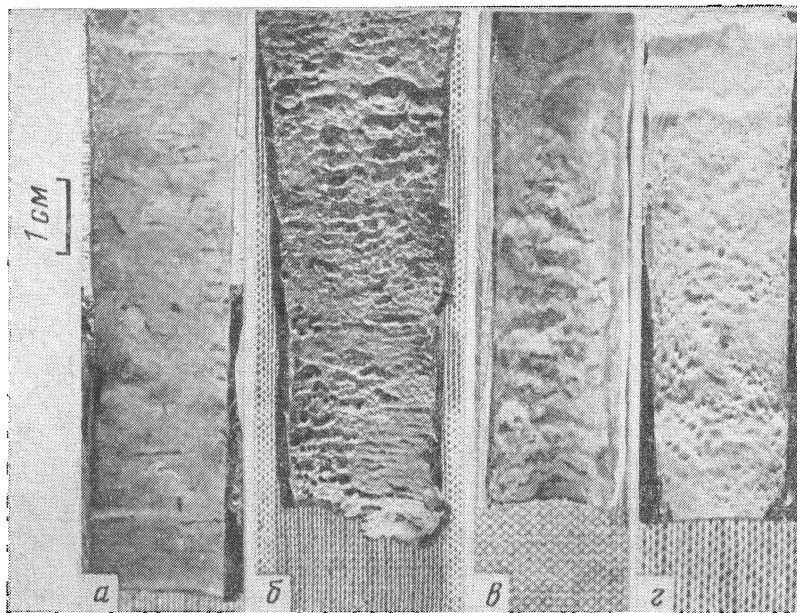


Рис. 2. Следовые отпечатки на свинце при детонации смеси 3. Относительные плотности зарядов: а — 0,44; б — 0,57; в — 0,66; г — 0,79 (направление распространения детонации снизу вверх)

жигания разогрев вещества. Именно уменьшением эффективной поверхности газификации компонентов и обусловлено замедление в первую очередь диффузионной части реакции. При этом профиль массовой скорости, полученный в зарядах большого диаметра (80 мм), имеет два участка спада массовой скорости, разделенных областью постоянства массовой скорости [7]. Это позволяет говорить о двух стадиях тепловыделения в детонационной волне, существенно разделенных по времени. По-видимому, неустойчивостью второй стадии, связанной с диффузионным взаимодействием продуктов газификации, и объясняются пульсации детонационного фронта. Заметим, что в этих условиях детонационный фронт чистого ПХА гладкий.

Для высокоплотных зарядов, где скорость детонации практически не зависит от плотности, можно предположить, что скорость детонации определяется в основном тепловыделением в результате горения зерен ПХА. Устойчивость детонационного фронта в этих условиях объясняется наличием лишь короткой первой зоны реакции. Об этом же свидетельствует сближение скоростей детонации смесей с различным соотношением компонентов со скоростью детонации чистого ПХА. Но для получения

более полной информации о детонационной волне в этой области необходимы измерения профилей давления.

Отметим, что экспериментально разделение стадий тепловыделения наблюдалось ранее в работах [8, 9]. В этих работах отсутствие диффузионного взаимодействия продуктов разложения отдельных компонентов (использовали как смеси окислитель — горючее, так и смеси индивидуальных ВВ) достигалось уменьшением времени реакции при использовании зарядов малого диаметра. О стадийности тепловыделения судили по характеру изменения зависимости скорости детонации от диаметра заряда.

Таблица 2

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta$	$D$ , м/с	$r$ , мм	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta$	$D$ , м/с	$r$ , мм
Смесь 2				Смесь 3			
780	0,47	3670	*	650	0,44	2940	*
1100	0,66	3690	1—3	850	0,57	2620	1—2
1210	0,72	3400	1—3	940	0,63	2280	2—4
1430	0,85	2180	*	990	0,66	2210	3—4
				1050	0,71	2230	5—6
				1170	0,79	2220	*

\* Гладкая поверхность.

В работе [10] изучен состав продуктов детонации аммотола, содержащего 20% нитрата аммония, в молекуле которого вместо обычного азота содержится изотоп <sup>15</sup>N. Заряды диаметром 12,7 мм с относительной плотностью 0,95 детонировали в массивной золотой оболочке. (Условия опыта близки к условиям в данной работе, к тому же зависимость критического диаметра аммотола от плотности показывает, что его детонационные характеристики аналогичны детонационным характеристикам смесевых составов.) Результаты свидетельствуют о том, что имеет место примерно 12%-ное смешение компонентов, а толщина эффективного диффузионного слоя равна ~0,6 мкм. Эти данные свидетельствуют о том, что в этих условиях вклад диффузионного взаимодействия в тепловыделение в детонационной волне мал.

Полученные результаты позволяют выдвинуть предположение о причине неустойчивости детонационного фронта конденсированных дисперсных ВВ вдали от критических условий распространения детонации [3—5]. Дело, вероятно, в том, что в отличие от газовой детонации, где неустойчивость связана с пространственным разделением ударного фронта и зоны реакции [1], здесь неустойчивость определяется пространственным разделением различных стадий тепловыделения. Тогда условия проведения опытов, не являясь критическими для существования детонации, могут оказаться критическими для одной из стадий тепловыделения и привести к наблюдавшимся в [3—5] явлениям неустойчивости.

Таким образом, приведенные исследования показали, что определяющее влияние на скорость детонации и структуру детонационного фронта смесей окислитель — инертное горючее оказывает стадийность тепловыделения. При высоких плотностях заряда скорость детонации определяется тепловыделением в результате горения зерен окислителя. Тепловыделение проходит в одну стадию, и детонационный фронт в этих условиях устойчив. В области низких плотностей стадии горения окислителя и взаимодействия продуктов газификации горючего и окислителя проходят в узкой области, примыкающей к фронту. Это обуславливает устойчивость детонационного фронта. В промежуточном диапазоне плотностей

стадия диффузионного взаимодействия находится на значительном расстоянии от ударного фронта и стадии горения окислителя, что, по-видимому, и приводит к неустойчивости детонационного фронта в этой области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Шелкин К. И.* Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Оборонгиз, 1949.
2. *Дрежин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.* Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
3. *Даниленко В. А., Афанасенков А. Н.* Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 8, с. 35.
4. *Даниленко В. А., Афанасенков А. Н.* Докл. АН СССР, 1981, т. 256, № 6, с. 1409.
5. *Даниленко В. А., Кудинов В. М.* Физика горения и взрыва, 1980, т. 16, № 5, с. 56.
6. *Обменин А. В., Коротков А. И., Сулимов А. А., Дубовицкий В. Ф.* Физика горения и взрыва, 1969, т. 5, № 4, с. 461.
7. *Маргынюк В. Ф., Сулимов А. А., Дубовицкий В. Ф.* Физика горения и взрыва, 1981, т. 17, № 4, с. 136.
8. *Воскобойников И. М., Соснова Г. С.* Прикл. математ. и техн. физика, 1961, № 4, с. 133.
9. *Апин А. Я., Воскобойников И. М., Соснова Г. С.* Прикл. математ. и техн. физика, 1963, № 5, с. 115.
10. *Макгайр Р., Орнелъяс Д., Акст И.* В кн.: Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981, с. 160.

Академия наук СССР  
Институт химической физики  
Москва

Поступила в редакцию  
27.XII.1982