

соответствующая ударная поляра для косой УВ в воде  $\Pi_1$  (см. рис. 5). Пересечение ударной поляры для отраженной УВ с ударной полярой воды позволило установить, что при максимальной плотности гексогена  $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$  максимальное давление в УВ, преломленной в воду, равно  $2,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ . Согласно (1), такому давлению соответствует составляющая скорости фронта ударной волны  $v = 1,78 \text{ км/с}$ . Поскольку при обработке фоторазверток процесса генерации УВ в воде вследствие взрыва ЭДВ-1 с воздушными прослойками получены начальные значения скорости фронта УВ вдоль щели в диапазоне 4200—3500 м/с, то регистрируемые ударные волны в воде генерируются при ударе стальной оболочки заряда через воздушный зазор о поверхность воды.

Определенные с помощью импульсной рентгеновской съемки значения  $D_*$  позволили с учетом (1) обработать экспериментальные результаты и построить зависимости давления во фронте УВ в воде при  $k = 1, 1,3, 1,5, 2,0$  от безразмерных расстояний  $R = r/R_0$  и  $\bar{r} = r/r_0$  (рис. 6). Из графиков следует, что в процессе распространения ударной волны степень затухания давления во фронте тем больше, чем больше величина воздушного зазора, но на расстоянии  $\sim 6r_0$  давление во всех случаях выравнивается. Это объясняется тем, что вначале стальная оболочка, разгоняясь в воздушном зазоре, накапливает кинетическую энергию и при ударе о поверхность воды генерирует ударную волну. Но чем больше  $k$ , т. е. величина воздушного зазора, тем к моменту удара ниже давление в ПД и, следовательно, слабее «поддержка» процесса со стороны ПД, а поэтому и более интенсивное затухание УВ.

По аналогичной методике проводилось экспериментальное исследование параметров УВ при подводном взрыве ЭДВ-1 в комбинированной оболочке плексиглас — песок. Внешний радиус плексигласовой прослойки 0,53 см, а прослойки из песка — 0,7 см. Установлено, что в этом случае амплитуда преломленной в воду ударной волны практически не затухает на расстоянии  $6r_0$ , по-видимому, вследствие сильной «поддержки» волны со стороны пористой прослойки из песка.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить принципиальную возможность управления параметрами ударных волн при подводном взрыве в ближней от заряда зоне.

Поступила в редакцию 1/VII 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Христофоров, Э. А. Широкова. ПМТФ, 1962, 5.
2. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
3. В. Ф. Куропатенко. ЧММСС, 1977, 8, 6.
4. Р. Курант, К. Фридрихс. Сверхзвуковые течения и ударные волны. М.: ИЛ, 1950.

УДК 662.215.1

### ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ТИПА ВЗВЕСИ С РАЗНОЙ ТЕКСТУРОЙ

*Б. Зыгмунт, Э. Влодарчык, А. Маранда,  
Е. Новачевски, М. Постэк  
(Варшава)*

Водонаполненные взрывчатые вещества, сенсibilизированные алюминиевой пылью, являются трехфазными смесями: твердая фаза — частицы Al, жидкая — насыщенный раствор неорганических нитратов, а пузырьки, образующие газовую фазу, чаще всего заполнены воздухом. Пузырьки газа играют существенную роль в процессе детонации обсужда-

емых ВВ [1], а детонационные свойства сильно зависят от объемного содержания газа в смеси. При объемном содержании воздуха ниже 8—10% эти вещества практически теряют способность к детонации [2].

Выполнение упомянутого выше условия, однако, недостаточно для придания смеси высокой способности к детонации. Большое значение имеет также взаимное расположение частиц алюминиевой пыли по отношению к остальным фазам смеси. Максимальные детонационные параметры достигаются для смесей, в которых частицы Al имеют надежный контакт с содержащимся в пузырьке воздухом [3]. В работе [2] предпринята попытка определения взрывных свойств в зависимости от характера расположения фаз, т. е. от текстуры смеси. Однако применяемая в ней методика подготовки образцов не позволяет приготовить смеси с одним определенным видом текстуры.

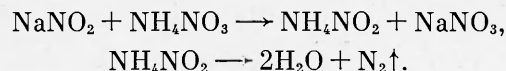
В настоящей работе найдены способы получения смесей с одним видом текстуры и проведены измерения взрывных свойств этих смесей.

### Методы подготовки образцов с определенной текстурой

Для трехфазной смеси теоретически существуют три возможности взаимного расположения отдельных фаз. Эти случаи графически представлены на рис. 1. В текстуре *A* частицы Al находятся внутри пузырька газа и не касаются его стенки, которую образует раствор нитратов. Этот случай нельзя реализовать в лабораторных условиях. В текстуре *B* частицы Al находятся на границе жидкой и газовой фаз, контактируя как с жидкостью, так и с газом. В текстуре *C* частицы Al и пузырьки газа разделены слоем жидкости и не контактируют друг с другом.

На рис. 2 представлены снимки текстур *B* и *C*. В реальных смесях обычно существуют комбинации описанных выше текстур, например *A + B*, *B + C*. Приготовление смесей только одной текстуры возможно лишь для случая *C*. Можно также приготовить смесь с доминирующей ролью текстуры *B* и с некоторым содержанием остальных текстур.

Смесь, в которой наблюдается только текстура *C*, получалась следующим образом: незагущенный водный раствор неорганических нитратов смешивался с обезжиренной пылью алюминия. Обезжиривание алюминия заключалось в удалении гидрофобного слоя стеариновой кислоты, покрывающей хлопья алюминия. Препарированная таким образом пыль Al легко смешивалась с раствором нитратов. После добавления пыли Al с целью гомогенизации смесь загущалась полимерной субстанцией. С целью введения в смесь пузырьков газа в процессе загущения добавлялся раствор нитрата натрия, который в этой среде разлагался, генерируя азот:



В вязкой взвеси выделяющийся азот образовал микроскопические пузырьки. Взвешенные в смеси частицы Al занимали примерно 4% объема смеси. Следовательно, вероятность возникновения зародыша пузырька на поверхности частицы Al была ничтожно малой. Можно предположить, что практически все частицы Al были отделены слоем жидкой фазы от пузырьков газа.

Микроскопические наблюдения на модельных образцах выявили некоторые характерные этапы роста пузырька и оказываемое им влияние на окружающие его хлопья Al. Это схематически представлено на рис. 3. В начальной стадии возникновения пузырька

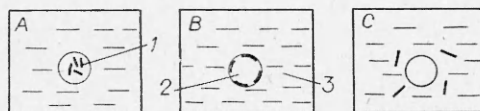


Рис. 1. Вид текстуры.

1 — частицы алюминия; 2 — пузырьки газа; 3 — жидкость.

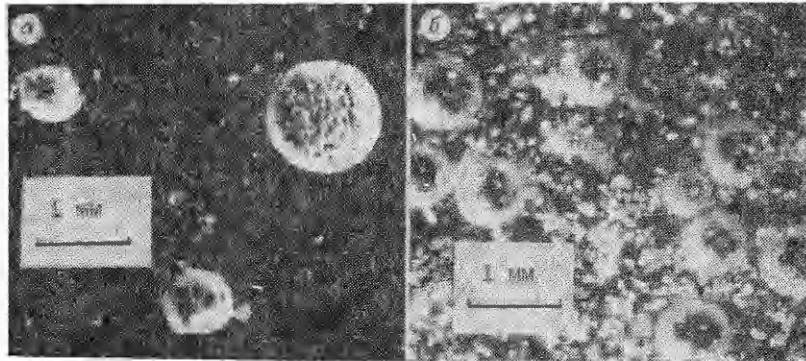
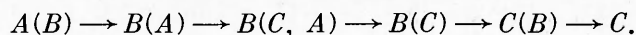


Рис. 2. Микроскопические снимки реальных смесей с текстурами *B* (а) и *C* (б).

газа хлопья *Al* расположены хаотически в жидкой фазе (рис. 3, а). Дальнейший рост размеров пузырька вызывает уменьшение средней толщины слоя жидкости, разделяющей частицы твердой и газовой фаз (рис. 3, б). Наконец, при некоторых размерах пузырька газа наступает пространственная ориентировка хлопьев *Al* по отношению к его поверхности. Хлопья *Al* укладываются параллельно к поверхности пузырька, не вступая, однако в непосредственный контакт с содержащимся в нем газом (рис. 3, в). Итак, начиная с некоторого содержания газа, смесь с текстурой *C* уподобляется смеси с текстурой *B*. Этот процесс усиливается с увеличением размеров и количества пузырьков, или, что то же, с удельным объемом смеси ( $1/\rho_0$ ).

Способ приготовления смеси с превалированием текстуры *B* описан в работе [2]. Заключается он в механическом смешивании гидрофобизированной пыли *Al* с концентрированным водным раствором неорганических нитратов. В процессе механического смешения осуществляется последовательный переход от текстуры *A* с примесью текстуры *B* — *A(B)* к текстуре *B* с примесью *A* — *B(A)* и, наконец, к текстуре *B* с примесью *C* и *A* — *B(C, A)*. Дальнейшее перемешивание приводит к текстуре *C*. Происходящие при этом изменения текстур можно записать схематически:



Прекращение перемешивания в соответствующий момент позволяет получить смесь с преобладанием текстуры *B* — *B(C, A)*.

Соответствующую этой текстуре степень смешения компонентов должен интуитивно оценить экспериментатор. Авторам не удалось найти такого физико-химического параметра, который коррелировал бы с изменениями текстуры смеси. Момент прекращения перемешивания можно, однако, определить экспериментально путем измерений параметров детонации. Смеси с текстурой *B* характеризуются

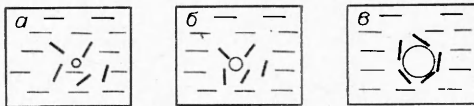


Рис. 3. Этапы роста пузырька в жидкой фазе.

максимальными значениями скорости детонации ( $D$ ), массовой скорости продуктов взрыва ( $u_1$ ), давления детонации ( $p_1$ ) и отчетливо сформированным химическим пиком за фронтом детонации [4].

### Влияние плотности на взрывные свойства смесей с разной текстурой

Для образцов смесей с разной текстурой измерены скорость детонации и критический диаметр в функции начальной плотности ( $\rho_0$ ) смеси. Критический диаметр определен методом конического заряда, скорость

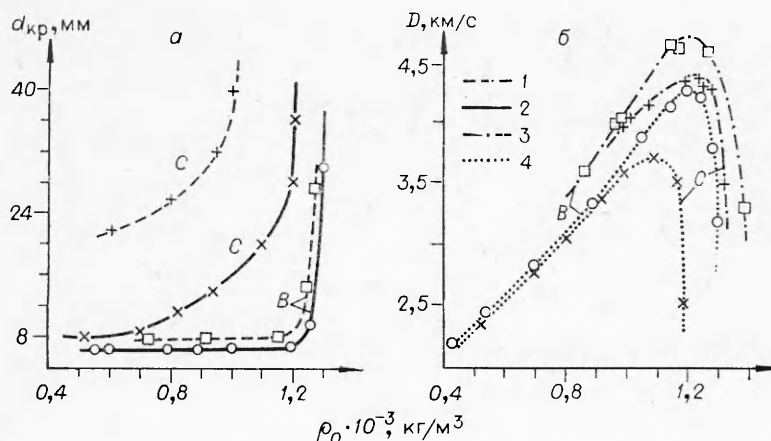


Рис. 4. Зависимость критического диаметра (а) и скорости детонации (б) смесей с текстурой В и С от плотности.

Содержание Al, %: 1—8, 2—4; заряды диаметром 36 мм: 3 — в стальных трубах, 4 — без оболочки.

детонации — измерением времени перехода фронта детонации через отрезки с известной длиной. Для этой цели применен электронный счетчик времени с разрешением 10 нс. Скорость детонации измерялась для зарядов с диаметром 36 мм в тонкой оболочке из пластмассы и в стальных трубах с внутренним диаметром 36 и толщиной стенки 3 мм.

На рис. 4 представлена зависимость критического диаметра ( $d_{кр}$ ) и скорости детонации в функции плотности смеси при содержании алюминия 8%. Способ подготовки образцов с текстурой В для этих измерений заключался в механическом перемешивании пыли Al с загущенным раствором нитратов. Таким образом, получены смеси с плотностью выше  $1,10 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, что отвечает объемному содержанию воздуха ~ 24%. Смеси с более низкой плотностью получены дополнительным газированием азотом. Химическое газирование смеси вводит в смесь пузырьки, не контактирующие с хлопьями алюминия (текстура С), однако при большом содержании газа, как уже отмечалось, текстура С уподобляется текстуре В. Образцы с текстурой С приготовлены описанным выше способом.

Следует заметить, что вследствие сильного влияния текстуры смеси на взрывные свойства получается значительный разброс результатов измерений (несколько десятков процентов) для одновременно приготовленных образцов ВВ с идентичным химическим составом и плотностью. На рис. 4 представлены зависимости скорости детонации и критического диаметра по экстремальным значениям этих параметров, которые удалось повторимым образом измерить. Такой способ обоснован более детально в работе [2]. Большое значение при этом имеет соблюдение определенных технологических правил при изготовлении образцов смесей (способ и время смешивания, вязкость смеси, температура и т. д.).

### Обсуждение результатов

Экстремальные значения параметров (наивысшая скорость детонации и наименьший критический диаметр) получены для смесей, в которых преобладает текстура В. Для этих смесей быстрый рост критического диаметра (свыше 30 мм) наступает при объемном содержании воздуха ниже 10%, в то время как для смесей с текстурой С — уже при 17% (см. рис. 4, а). При некоторой плотности наблюдается максимум скорости детонации (см. рис. 4, б), как и для взрывчатых двухкомпонентных

смесей [5]. При измерении скорости детонации в тонких оболочках для смесей с текстурой *B* значение оптимальной плотности более высокое, чем с текстурой *C* (соответственно  $1,22$  и  $1,10 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), но это связано с близостью смесей с текстурой *C* к критическому диаметру. При измерении скорости детонации в стальных трубах оптимальная плотность для смесей с текстурой *B* и *C* почти одинакова ( $\sim 1,25 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

При больших плотностях смесей наблюдается значительное различие во взрывных свойствах в зависимости от текстуры, которое уменьшается с ростом содержания газа в смеси. Ниже плотности  $10^3$  кг/м<sup>3</sup> скорость детонации уже не зависит от текстуры, разница же в значениях критического диаметра смесей с разной текстурой отмечается во всей исследуемой области плотности, причем соответствующие кривые на рис. 4, а сближаются асимптотически.

Описанный выше процесс уменьшения различия взрывных свойств смесей с разными текстурами по мере падения плотности можно связать с «выравниванием» текстур. Как замечалось, рост содержания газовой фазы в смеси с текстурой *C* приводит к пространственной ориентировке частиц Al по отношению к поверхности пузырьков газа и уменьшению среднего расстояния между этими компонентами. В результате текстура *C* переходит в *B*. Можно сделать вывод, что в процессе детонации большое значение имеет толщина слоя жидкости, разделяющая хлопья алюминия и пузырьки газа. Когда существует непосредственный контакт частиц Al и газа (толщина слоя жидкости равна нулю), взрывные параметры экстремальны. Разделение этих компонентов слоем жидкости отражается прежде всего в уменьшении чувствительности смеси к взрыву, а также в росте критического диаметра.

Дополнительным аргументом, подтверждающим большое влияние толщины слоя жидкости, разделяющей частицы Al и пузырьки газа являются результаты измерений критического диаметра для смесей с содержанием 4% Al (см. рис. 4, 2). Несмотря на двукратное уменьшение содержания сенсibilизирующего компонента, разница в значениях критического диаметра для смесей с текстурой *B*, содержащих 4 и 8% Al, сравнительно небольшая. Для смесей с текстурой *C* различие существеннее. Детонирующие смеси с текстурой *C*, содержащей 4% Al, получены лишь в самой низкой области исследуемых плотностей. Это соответствует сделанным выводам, ибо в смеси с содержанием 4% Al средняя толщина слоя жидкости, разделяющей частицы Al и пузырьки газа, больше, чем в смеси с 8% Al. Выравниваются значения критических диаметров обеих смесей при значительно более низкой плотности смеси, содержащей меньшее количество алюминия. Итак, взрывные свойства водонаполненного ВВ, сенсibilизированного алюминиевой пылью, зависят в большой степени от взаимного расположения частиц отдельных фаз: твердой (хлопья Al), жидкой (насыщенный водный раствор неорганических нитратов) и газовой (пузырьки воздуха). Экстремальные взрывные параметры наблюдаются для смесей, в которых частицы твердой фазы непосредственно контактируют с газом, содержащимся в пузырьках. Разделение этих компонентов слоем жидкой фазы вызывает падение взрывных параметров смеси вплоть до полной потери способности к детонации при некоторой толщине слоя жидкости.

Каждый из компонентов обсуждаемых смесей играет определенную и важную роль в процессе детонации. Дефицит одного из них вызывает отчетливое падение способности смеси к детонации [2]. На основе проведенного исследования можно предположить механизм физико-химических процессов, приводящих к развитию детонации в обсуждаемых взрывчатых смесях. Иницирующую роль следует приписать пузырьку газа, параметры состояния которого испытывают наибольшие изменения в процессе ударного сжатия трехфазной среды. Подогретый до высокой температуры газ передает тепло окружающему его алюминию. Частицы алюминия подогреваются до температуры, при которой возможен ход экзотер-

мических реакций с компонентами жидкой фазы, что приводит к подержанию процесса детонации. Отделение пузырька газа от алюминия слоем жидкости затрудняет перенос тепла. Это вызывает уменьшение чувствительности смеси и падение взрывных параметров.

Поступила в редакцию 11/VI 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. Cook. *Ind. Eng. Chem.*, 1968, 60, 7.
2. A. Maranda, J. Nowaczewski et al. *J. Techn. Phys.*, 1979, 20, 3.
3. R. V. Robinson. *Canad. Mining Metallurg.*, 1969, 10.
4. A. Maranda, J. Nowaczewski et al. *J. Techn. Phys.*, 1979, 20, 1.
5. C. H. Johansson, P. A. Persson. *Detonics of high explosives*. Stockholm, SDRF, 1970.

УДК 534.2.222

### О ДЕТОНАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕПЕРЕМЕШАНЫМИ ФАЗАМИ

*В. М. Гендугов*

*(Москва)*

Детонация в гетерогенных системах с предварительно перемешанными фазами может распространяться в трубах, заполненных газообразным окислителем, внутренняя поверхность которых покрыта пленкой жидкого топлива [1—5]. Наличие за фронтом детонационной волны ударных и касательных разрывов усложняет течение. Однако в агрессивных гетерогенных системах разрывы ослаблены и при изучении процесса их можно не учитывать [6]. В этом случае течение непрерывно, процесс образования реагирующей смеси — определяющий в распространении детонации.

В [7] показано, что для пленок, устойчивых к воздействию фронта волны, испарение с поверхности жидкого топлива — единственный процесс, определяющий образование парогазовой реагирующей смеси. С достаточной полнотой описывает волну детонации в данном случае видоизмененная модель Зельдовича — Неймана — Деринга, в которой неоднородная зона реакции находится между фронтом детонационной волны и плоскостью Чепмена — Жуге.

Главная трудность, стоящая при разработке теории детонации в рамках принятой модели, заключается в определении условия, замыкающего уравнения на детонационной волне. В работах [8, 9] при исследовании детонации в системах с очень тонкой пленкой предложено помещать плоскость Чепмена — Жуге в точку полного испарения топлива с поверхности трубы. Процессы в системах с избытком горючего рассмотрены в [10, 11]. Авторами сформулировано следующее условие, замыкающее уравнения сохранения: величина тепловыделения в зоне реакции на единицу массы окислителя не зависит от состава продуктов и равна соответствующей величине для гомогенной детонации стехиометрического состава.

В отличие от моделей, рассмотренных в [9—11], в данной работе уравнения сохранения на волне гетерогенной детонации замыкаются условием баланса потоков энергии на плоскости Чепмена — Жуге [12]. Исследование ограничено детонацией в системах с «толстой» пленкой, когда в точке расположения плоскости Чепмена — Жуге на стенках трубы имеется топливо.

Рассмотрим бесконечную трубу постоянного поперечного сечения с площадью  $S$  и периметром  $L$ ,  $k$ -я доля внутренней поверхности кото-