

В заключение автор выражает благодарность М. Е. Топчиану за внимание к работе и полезное обсуждение.

Поступила в редакцию  
6/IV 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиан. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
2. G. L. Schott. The Physics of Fluids, 1965, 8, 5.
3. В. Е. Гордеев. Докл. АН СССР, 1974, 215, 3.
4. A. K. Macpherson. J. of Fluid Mechanics, 1969, 5, 3.
5. А. А. Борисов, С. М. Когарко. Докл. АН СССР, 1963, 149, 3.
6. В. И. Манжалеи, В. В. Митрофанов. ФГВ, 1973, 9, 5.
7. М. Е. Топчиан, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1976, 12, 6.

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЖИДКИХ РАСТВОРАХ НИТРОБЕНЗОЛА В ТЕТРАНИТРОМЕТАНЕ И ФТОРНИТРОФОРМЕ

*Е. В. Зотов, Г. Б. Красовский, В. Н. Рыжова*  
(Москва)

Многие смеси (растворы) тетранитрометана с органическими веществами являются взрывчатыми, при этом по мощности они заметно превосходят тротил [1]. Однако такие смеси высокочувствительны и имеют очень малый критический диаметр ( $d_{кр}$ ). Например, для стехиометрической смеси тетранитрометана (ТНМ) с нитробензолом (НБ)  $d_{кр} = 0,05$  мм [2], для смеси ТНМ с дизельным топливом  $d_{кр} \leq 0,5$  мм [3]. У смеси ТНМ с бензолом (87/13)<sup>1</sup> фронт нормальной детонации гладкий, что свидетельствует о таком малом времени реакции на фронте волны, когда ширину зоны тепловыделения практически не удается зарегистрировать [4].

Наличие жестких оболочек, с одной стороны, позволяет отдалить момент прихода волн боковых разгрузок, влияющих, согласно принципу Харитона, на тепловыделение в зоне реакции, с другой стороны, может приводить к потерям за счет теплопроводности [5, 6]. При совокупности перечисленных факторов представляет большой интерес изучение предельных условий распространения детонации в очень тонких слоях ЖВС, ограниченных тонкими стенками.

#### Методика эксперимента

Поскольку наличие оболочки приводит к заметному уменьшению величины критического диаметра [2, 7], при выборе методики проведения опытов с раствором ТНМ + НБ возникают определенные трудности. Они связаны, во-первых, со способом получения постоянного диаметра ЖВС, меньшего 0,05 мм, на достаточно большой длине, во-вторых, со способом регистрации процессов, происходящих в таких тонких капиллярах, из-за недостаточной интегральной яркости свечения детонационного фронта. Информация же о прохождении детонации по капилляру, по деформации пластинок из фольги, подкладываемых под заряд, явно недостаточна.

<sup>1</sup> Здесь и дальше приведено массовое соотношение компонентов.

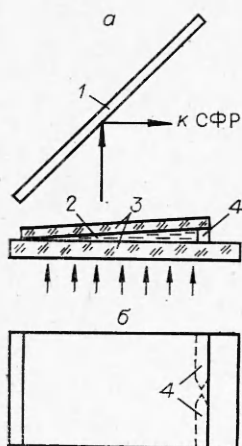


Рис. 1. Редакция опытов по исследованию детонационных процессов в тонких клиновидных слоях ЖВС.  
а) вид сбоку; б) вид сверху.

По этой причине вместо стеклянных капилляров, использовавшихся для исследования детонационной способности, например, ЖВС на основе азотной кислоты [8] или жидкой азотистоводородной кислоты [9], в настоящей работе применялся метод клина [10], образованного пластинками из стекла. Такой метод позволяет проследить все последовательные фазы детонационного процесса. Постановка опытов показана на рис. 1.

Клиновидный слой ЖВС 2 заключался между пластинками 3 толщиной 6—7, длиной 100—250 и шириной 40—60 мм. Начальная толщина клина определялась толщиной прокладки и изменялась от 0,3 до 0,02 мм. На другом конце клина пластины соприкасались. Процесс регистрировался через зеркало 1 на СФР в режиме щелевой развертки или покадровой съемки. Толщина слоя ЖВС измерялась путем последовательного измерения толщины пластины и сборок (с помощью часового индикатора) в определенных точках, расположенных вдоль линии, совмещаемой в опыте со щелью фотохронографа.

В части опытов регистрировалось собственное свечение процесса, в другой части применялось освещение сборки лампой ИФК-50 с отражателем. Момент вспышки лампы был синхронизирован с моментом иницирования ЖВС. Свет от матового экрана собирался линзой и проходил через сборку. ЖВС иницировалась с помощью дополнительной шашки, расположенной у толстого конца клина (в этом случае там создавался избыточный объем ЖВС), или электрическим разрядом между двумя электродами из фольги 4, толщина которых одновременно определяла начальную толщину слоя ЖВС. Пластины складывались под очень малым углом, ЖВС удерживалась между ними за счет сил поверхностного натяжения. Опыты проводились с растворами нитробензола в тетрагидрофуране и фторнитроформе (фтортринитрометане).

### Экспериментальные результаты

Регистрация процессов по их собственному свечению не позволяет провести детальный анализ, в особенности это касается тех процессов, которые идут после прекращения детонации с нормальной скоростью  $D_n$ . Типичная фотохронограмма опыта в такой редакции показана на рис. 2. Момент  $t_0$  соответствует моменту иницирования ЖВС или началу распространения детонации в слое между пластинами. В момент  $t_1$  детонация с нормальной скоростью переходит в низкоскоростной режим. При этом наблюдаются только отдельные вспышки, распространяющиеся вдоль клина с постоянной, но малой скоростью, аналогичные вспышкам низкоскоростного режима в нитроглицерине [11] ( $t_2$  — момент взрыва ЖВС, находящейся в избыточном объеме на тонком конце клина). Из-за уменьшения толщины клина и соответственно яркости свечения в данной редакции трудно определить момент прекращения детонации с  $D_n$ .

Значительно большая информация может быть получена в опытах с импульсной подсветкой сборки. Две типичные фотохронограммы процессов приведены на рис. 3. Смесь иницировалась с помощью электрического разряда в тонком слое (начальная толщина  $\sim 0,1$  мм), заключенном между стеклянными пластинами. Как видно из рис. 3, при пробое могут возникать два процесса: детонация с нормальной скоростью

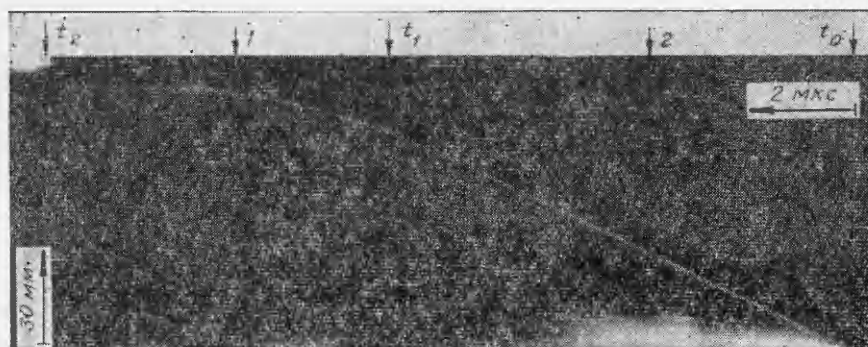


Рис. 2. Фотохронограмма процесса распространения детонации в тонком клиновидном слое ЖВС ТНМ+НБ.  
1 — низкоскоростной режим; 2 — детонация с нормальной скоростью.

(а) и низкоскоростной режим (б). Причиной возбуждения последнего при одних и тех же параметрах подрывного высоковольтного импульса (экспоненциально спадающего) явилось увеличение межэлектродного промежутка, что соответствовало ослаблению инициирующего импульса (или снижению надежности инициирования).

Наибольшее число опытов проведено с ЖВС ТНМ/НБ<sup>2</sup> (74/26). Отмечено, что скорость в низкоскоростном режиме не имеет какого-либо постоянного значения, а меняется от опыта к опыту от 1,5 до 3 мм/мкс. Если низкоскоростной режим распространяется в слое толщиной  $\sim 0,05$  мм, на некотором расстоянии он может перейти в детонацию с  $D_n$  (момент  $t_1$  на рис. 3, б). Причина этого найдена в опытах с покадровой съемкой процесса. Опыты показали, что подобный переход происходит на боковом краю клина, по-видимому, за счет кавитации жидкости и создания более благоприятных условий для возникновения детонации с нормальной скоростью. Поскольку изображение щели СФР располагалось в середине клина, то поначалу большая скорость детонации с  $D_n$  на фотохронограмме рис. 3, б при смене режима объясняется фазовой скоростью точек пересечения косых детонационных фронтов с линией щели СФР. Линия 3 соответствует дореагированию продуктов НСР на фронте ударной волны, идущей от развившейся детонации на краю клина.

Получено, что детонация с нормальной скоростью для указанного состава ЖВС может распространяться в слоях толщиной до  $\sim 0,015$  мм. При дальнейшем уменьшении толщины слоя детонация переходит в низкоскоростной режим (момент  $t_2$  на рис. 3, б). Предельные условия распространения последнего не найдены, хотя можно говорить о толщине, меньшей  $\sim 0,01$  мм. Поскольку скорость звука в оболочке из стекла превышает скорость звука в ЖВС, то распространение низкоскоростного режима устойчивое (см., например, [12—14]) и имеет очаговый характер, соответствующий кавитационной модели этого явления. Следует отметить, что переход одного режима в другой всегда сопровождается предварительным плавным уменьшением скорости детонации на 10—15% (на уменьшение  $D$  вблизи предела указывалось также для растворов на основе азотной кислоты [8]).

Из рис. 3 видно, что за фронтом детонации существует почти прозрачная область. Это говорит о том, что продукты взрыва (ПВ) содержат мало твердого углерода (о наличии довольно прозрачных ПВ у других смесей на основе ТНМ приводятся сведения в работе [15]). Продукты реакции в низкоскоростном режиме непрозрачны.

<sup>2</sup> Этот состав имеет максимальную скорость детонации 7500 м/с.

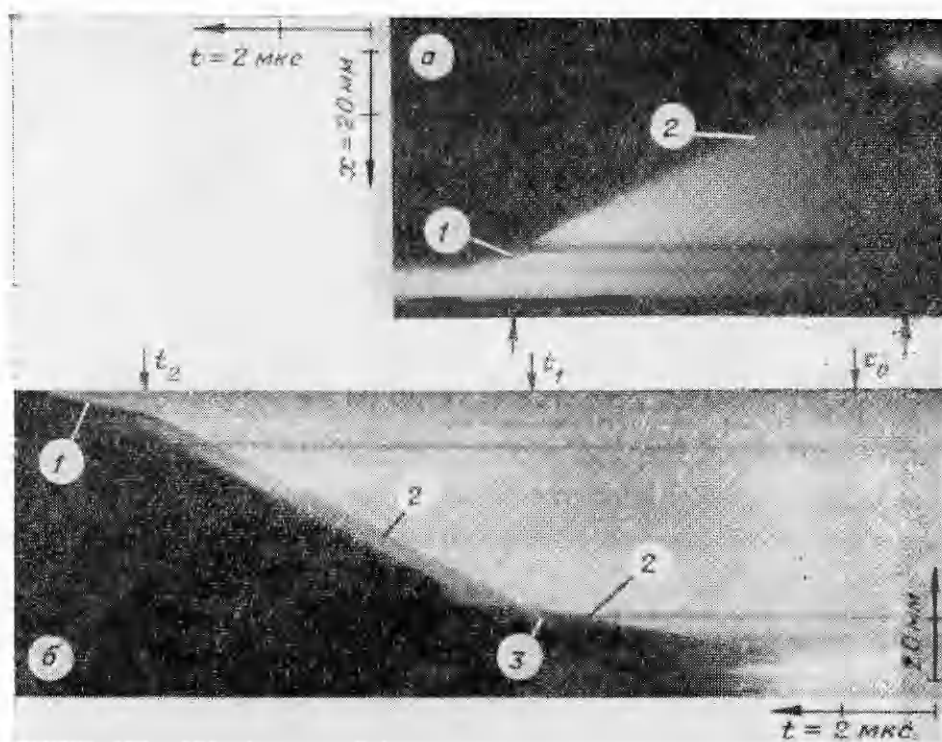


Рис. 3. Фотохронограммы процессов распространения детонации в тонком клиновидном слое ЖВС ТНМ+НБ в опытах с импульсной подсветкой.

1 — низкоскоростной режим; 2 — детонация с  $D_H$ ; 3 — дореагирование продуктов низкоскоростного режима.

В литературе отсутствуют данные о существовании низкоскоростного режима в смеси тетранитрометана с нитробензолом. По-видимому, это связано со следующими обстоятельствами. Многие исследования (например, в [16]) велись со слоями, значительно превышающими  $d_{кр}$ , когда практически не удается обеспечить стационарность процесса. Поскольку  $\dot{a}_{кр}$  мал, следует ожидать и малости энергии инициирования детонации с нормальной скоростью (при разумных значениях энергии активации термического разложения и теплоты реакции ВВ). Тогда образование локального очага разложения, достаточного для возникновения взрыва, возможно при пересечении ударных фронтов, например в области микронеровностей стенок сосуда и т. п.

Распространение детонации в слоях ТНМ/НБ других составов (85/15 и 65/35) ничем принципиально не отличается от описанного. Уменьшается начальная скорость, а переход из одного режима в другой происходит при большей толщине слоя ( $\sim 0,03$  мм).

В опытах с ЖВС фторнитроформ/нитробензол (только состава 75,6/24,4, имеющего максимальную скорость детонации  $\sim 7230$  м/с) инициирование осуществлялось с помощью дополнительной шашки, так что начального возбуждения низкоскоростного режима не наблюдалось. Если начальная толщина клина превышает величину  $\sim 0,03$  мм, то в слое распространяется детонация со скоростью  $\sim 7230$  м/с, в слоях  $\sim 0,03$  мм происходит плавное уменьшение  $D$  на 8—15%, а при толщине слоя 0,02—0,025 мм и менее уже видны только отдельные вспышки (в опытах без дополнительной подсветки), распространяющиеся по слою с малой скоростью ( $\sim 2150$  м/с). При начальной толщине, меньшей 0,03 мм, начальная скорость ниже максимальной на 8—15%, затем процесс повторяется.

Для проверки влияния оболочки на распространение детонации с  $D_n$  проведены опыты с ЖВС ТНМ/НБ 74/26, слой которой находился между двумя пленками из целлулоида толщиной 0,13 мм. Следует отметить, что при отсутствии жестких стенок не удается возбудить детонацию в слоях ЖВС толщиной 0,1 мм с помощью электрического разряда, поэтому начальный участок сборки помещался между пластинками из стекла толщиной 2 мм. Для обеспечения одинаковой толщины слоя ЖВС (0,05 мм) по всей длине сборки (60 мм) между пленками были положены две полоски из фольги. Получено, что детонация распространяется устойчиво по всей длине.

При отсутствии продольных полосок из фольги обе пленки, смоченные ЖВС, слипаются, в результате чего образуется переменный слой ЖВС с начальной толщиной, определяемой толщиной электродов искрового разрядника. В опытах также виден переход детонации в низкоскоростной режим. Однако эти опыты имели качественный характер, и условия устойчивости низкоскоростного режима в них не найдены. Тот факт, что детонация не возбуждается при разряде в тонких слоях ЖВС между пленками из целлулоида, находит следующее объяснение. Известно, что вспышки, вызванные местными разогревами, могут не привести к возбуждению детонации, если в зону вспышек приходит волна разгрузки. Чтобы сформировалась детонационная волна, необходимо некоторое время, в течение которого за счет резкого повышения температуры усиливается скорость химических реакций.

*Поступила в редакцию  
21/IX 1978*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л., Химия, 1973.
2. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
3. В. А. Одинцов. ЖПХ, 1961, 34, 5.
4. А. Н. Дремлюк, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., Наука, 1970.
5. Ю. Б. Харитон.— В сб.: Вопросы теории взрывчатых веществ. Вып. 1. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
6. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. М., Гостехиздат, 1955.
7. Р. Х. Курбангалина, Л. И. Патронова. ФГВ, 1976, 12, 4, 643.
8. Р. Х. Курбангалина. ЖПХ, 1959, 32, 7, 1467.
9. Г. С. Яковлева, Р. Х. Курбангалина. ФГВ, 1976, 12, 5, 774.
10. S. Fujiwara, M. Kusakabe, T. Nikita. Explosion and Explosives, Japan, 1970, 31, 3, 138.
11. В. Е. Гордеев, Ю. С. Матвеев, Н. Ф. Велина. ФГВ, 1970, 6, 3, 352.
12. А. В. Дубовик, Н. М. Воскобойников, В. К. Боболев. ФГВ, 1966, 2, 4, 97.
13. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 4, 493.
14. R. W. Watson, C. R. Summers et al. Proc. 4-th Symposium (International) Detonation. Washington, 1967.
15. H. D. Mallory, R. A. Plauson. Nature, 1963, 199, 4888.
16. E. Haenseler. Explosivstoffe, 1953, 516, 64.