

При рассмотрении преломления ударных волн методом ударных поляр Хендерсон [17] показал, что экспериментально осуществляются всегда конфигурации, соответствующие наиболее слабому решению из возможных, где интенсивность преломленной волны наименьшая.

В случае преломления детонационных волн также осуществляется более слабое решение. Это является, вероятно, следствием известной внутренней неустойчивости детонационной волны и сложного строения ее фронта. При резком изменении параметров происходит распад детонационной волны, аналогичный распаду волны при ее дифракции.

Поступила в редакцию
8/IV 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Г. Гвоздева. Сб. «Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах. М., «Наука», 1964.
2. Л. Г. Гвоздева. ЖТФ, 1961, **31**, 6, 731.
3. D. H. Edwards, T. G. Jones. Brit. J. Appl. Phys., 1960, **11**, 190.
4. B. Greifert, I. C. Cooper. a.o. J. Appl. Phys., 1965, **28**, 3, 289.
5. I. P. Toennis, H. G. Wagner. Electrochemie, 1955, **59**, 1.
6. Y. N. Denisov, Ya. K. Troshin. X-th Symposium on Combustion, Pittsburgh, 1965, 600.
7. А. В. Гурвиц и др. Таблицы термодинамических свойств вещества. М., Изд-во АН СССР, 1962.
8. I. Glass, A. Takano. Progress in Aeron. Sci. Pergamon Press, London, 1965, **6**, 163.
9. I. E. Dugay. Utias Report, 1967, 124.
10. И. М. Набоко. Сб. «Исследования по физической газодинамике». М., «Наука», 1966.
11. Д. А. Спенс. Механика, 1962, **6**, 76.
12. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1940, **10**, 542.
13. Л. Г. Гвоздева. ПМТФ, 1961, **5**, 53.
14. Г. Курант, К. Фридрихс. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М., ИЛ, 1950.
15. Л. Г. Гвоздева, О. А. Предводитель. Докл. АН СССР, 1965, **163**, 5.
16. C. L. Eisen, R. A. Gross, T. J. Rivlin. Combustion and Flame, 1960, **4**, 2, 137.
17. W. Bleakney, A. H. Taub. Rev. Mod. Phys., 1949, **21**, 584.
18. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. Гостехиздат, 1959.
19. L. E. Henderson. J. Fluid. Mech., 1966, **26**, 3, 607.

УДК 662.215.1+534.222.2

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРЕДЕТОНАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В ПОРИСТЫХ ВВ

А. В. Обменин, А. И. Коротков,
А. А. Сулимов, В. Ф. Дубовицкий
(Москва)

Переход горения пористых ВВ в детонацию можно представить схемой (рис. 1), которая включает следующие стадии: I — послойное горение; II — конвективное горение, характеризующееся неровным («рваным») фронтом; III — конвективное горение с достаточно гладким фронтом; IV — низкоскоростной режим; V — детонация. Послойное горение распространяется теплопроводностью, конвективное горение —

путем проникновения газообразных продуктов в поры ВВ. Низкоскоростной режим возбуждается волнами сжатия, детонация — ударной волной. Развитие процесса в целом является ускоренным. Существование и протяженность каждой из стадий зависят от структуры заряда, свойств ВВ и условий опыта. Конвективное горение с неровным фронтом (II) характерно для пористых ВВ и обусловлено проникновением горения по имеющимся в заряде порам с последующим выходом на боковую поверхность [1, 2]. Стадия III соответствует, как будет показано ниже, конвективному распространению горения между поверхностью заряда и оболочкой. Опытами, проведенными с единичной порой, было показано [2], что конвективное горение по поре может распространяться с практически постоянной по длине и высокой скоростью порядка сотен метров в секунду.

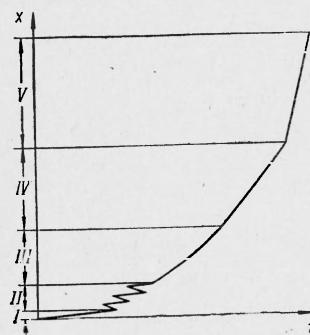


Рис. 1. Схема перехода горения пористых взрывчатых веществ в детонацию.

стость, которая в зависимости от условий эксперимента изменяется от 700 до 2000 м/сек. Боуден установил [6], что если тонкий ($\sim 0,1$ мм) слой тэна, зажатый между твердыми поверхностями, инициировать искрой, то возникает режим со скоростью порядка 1000 м/сек. В. К. Боболов [3, 5] наблюдал в слоях сильно спрессованных ВВ, заключенных между пластинами, при инициировании ВВ взрывом проволочки возникновение низкоскоростного режима, скорость которого для гексогена и тэна составляла соответственно 800 и 1000 м/сек. При поджигании литых ВВ (пентолит, дина) в замкнутых стальных трубах величина скорости указанного режима равнялась 1000–2000 м/сек [4, 7].

Имеющиеся в литературе данные по изучению переходных режимов соответствуют различным условиям постановки эксперимента, и систематические исследования отсутствуют.

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные, касающиеся обоснования и существования стадии III (см. рис. 1), а также данные о зависимости скорости распространения низкоскоростного режима IV от пористости t , диаметра заряда d и свойств оболочки, полученные в единой постановке проведения опыта. Инициирование реакции в ВВ, запрессованном порционно в замкнутую оболочку, осуществлялось путем поджигания проволочкой, накаливаемой током¹. Длина заряда ВВ L была не менее 100–150 мм. Регистрация переходных процессов производилась ждущим фоторегистратором ЖФР-2 с боковой поверхности заряда.

Было проведено несколько серий опытов в оболочках из различных материалов (плексиглас, латунь, сталь) с однородными ВВ — тэном, гексогеном, а также стехиометрической смесью перхлората аммония с полистиролом.

Для удобства изложения рассмотрим первоначально основные

¹ Во всех опытах плотность заряжения была равна начальной плотности ВВ.

экспериментальные результаты о закономерностях распространения низкоскоростных режимов.

Опыты в плексигласовой оболочке. В этой серии опытов использовался тэн¹ с начальным размером частиц $r \approx 500 \text{ мкм}$ различной пористости m ($m = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_m}$, ρ_0 — начальная плотность ВВ, ρ_m — плотность монокристалла). Величина пористости изменялась от 0,2 до 0,4. Толщина оболочки составляла $d=45 \text{ мм}$.

О возникновении низкоскоростного режима судили по опытам, в которых заряд ВВ разъединялся стальной пластиной толщиной 1 мм .

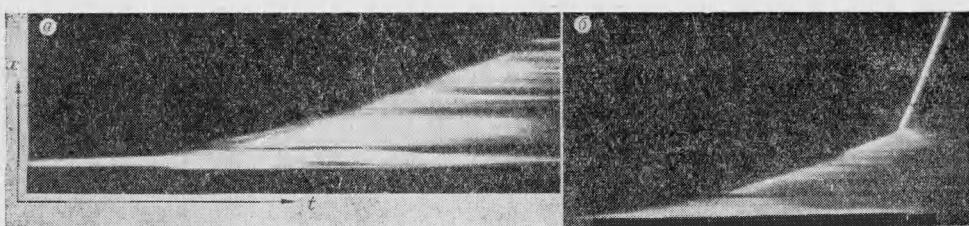


Рис. 2. Фотография процесса, возникающего при поджигании тэна в плексигласовой оболочке; длина заряда 150 (а) и 300 мм (б).

Пластина, диаметр которой в несколько раз превышал диаметр заряда, отсекала продукты горения и не препятствовала прохождению волн сжатия. Для тэна было установлено, что при скорости, превышающей 800 м/сек , процесс передавался через пластину. При меньших скоростях процесс обрывался в месте расположения преграды.

На рис. 2, а показана характерная фотография процесса ($m=0,2$, $L=150 \text{ мм}$, $d=5 \text{ мм}$). На расстоянии $\sim 30 \text{ мм}$ от точки поджигания скорость процесса составляет 800 м/сек и на оставшейся базе длиной 120 мм увеличивается до 1000 м/сек . Близкое значение скорости было получено в работе [3].

Значительное число опытов, проведенных с теном данной пористости ($d=5 \text{ мм}$), показало, что скорость низкоскоростного режима в конечной стадии (на базе 80-100 мм) возрастает на 150-200 м/сек .

Из рассмотрения оптических записей, полученных при съемке с боковой поверхности заряда, следует, что, как правило, фронт низкоскоростного режима является достаточно гладким. Однако в отдельных опытах наблюдаются пульсации, неровности на фронте, а также разрывы свечения.

В табл. 1 представлены средние по длине заряда значения скорости низкоскоростного режима при различных значениях пористости и диаметра заряда ($L=150 \text{ мм}$).

Из таблицы следует, что при диаметре заряда 10 мм скорость режима не зависит от пористости в интервале изменения последней от 0,2 до 0,04. Увеличение диаметра заряда с 5 до 10 мм при постоянной

Таблица 1

Пористость	Диаметр заряда, мм	Средняя скорость низкоскоростного режима, м/сек
0,20	5	900
0,20	10	1100*
0,13	10	1100
0,10	10	1100
0,04	10	1100

* Режим переходил в детонацию.

¹ Горение гексогена и смеси прехлората аммония с полистиролом в условиях малопрочной плексигласовой оболочки затухало.

пористости 0,2 приводит к небольшому увеличению скорости режима, однако при этом нарушается его устойчивость и наблюдается возникновение детонации.

Низкоскоростной режим в данных условиях может быть переведен в детонацию не только путем увеличения диаметра (см. табл. 1), но также и увеличением длины заряда, если пористость заряда выше предельной¹ $m_{\text{пр}}$. Так, например, при пористости 0,2 и длине заряда 150 мм ($d=5$ мм) низкоскоростной режим не переходил в детонацию. Однако указанный переход наблюдался, как только длина заряда была увеличена до 300 мм (см. рис. 2, б).

Предельная пористость тэна для применяемой плексигласовой оболочки при $d=10$ мм равна 0,18. Максимальная скорость низкоскоростного режима перед возникновением детонации не превышала 1100 м/сек.

Одновременно с оптической регистрацией процесса была проведена запись давления непосредственно в продуктах реакции (в канале оболочки) поршневым пьезоэлектрическим датчиком, размещенном вблизи точки поджигания. Сигнал с датчика через усилитель записывался на катодном осциллографе. Датчик и регистрирующая аппаратура позволяли надежно записывать давление до 10 кбар, если быстрота изменения давления во времени $\frac{dp}{dt} < 0,3$ кбар/мксек. Градуировка датчика осуществлялась динамико-статическим способом.

На рис. 3 представлена типичная запись давления во времени. Максимальное давление, реализуемое в используемой плексигласовой оболочке до разрушения, составляет по результатам измерений около 6 кбар, средняя скорость процесса ~ 900 м/сек. Было установлено, что увеличению по длине заряда скорости низкоскоростного режима на 200 м/сек соответствует возрастание давления в оболочке на 1:3 кбар. Таким образом, скорость режима зависит от давления, которое имеет место при его распространении.

Для выяснения природы низкоскоростных режимов были проведены опыты, когда заряд тэна ($m=0,2$) по всему диаметру разделялся тонким (0,5 мм) слоем азида свинца, который использовался в качестве индикатора [5], позволяющего фиксировать распространение волн сжатия. Было установлено что взрыв азида свинца происходил впереди светящегося фронта на расстоянии, не превышающем нескольких миллиметров.

Кроме того, была проведена съемка с торца. С этой целью в заряд ВВ на участке, где наблюдалось распространение низкоскоростного режима, помещались специальные светопроводы, один из которых размещался в центре заряда, другие — по боковой поверхности. Разведочные опыты указывают на то, что фронт низкоскоростного

Рис. 3. Осциллограмма записи $p(t)$ (время возрастает слева направо).

которых размещался в центре заряда, другие — по боковой поверхности. Разведочные опыты указывают на то, что фронт низкоскоростного

¹ Под предельной понимается то минимальное значение пористости, при котором наблюдается переход низкоскоростного режима в детонацию при конкретных условиях опыта. При $m < m_{\text{пр}}$ наблюдается только распространение низкоскоростного режима.

режима не является плоским: вначале свечение фиксируется в центральной, а затем на периферийной части заряда.

Опыты в металлических оболочках. В этой серии опытов применялись латунные и стальные оболочки с толщиной стенки $\delta=25 \text{ мм}$, а в качестве исследованных ВВ — тэн, гексоген и стехиометрическая смесь

Таблица 2

ВВ	Материал оболочки	Пористость	Толщина стенки оболочки, мм	Средняя скорость низкоскоростного режима, м/сек	Объемная скорость звука в ВВ, м/сек
Тэн	Плексиглас	0,04	45	900	
	Латунь	0,02	25	2600	
	Сталь 45	0,02	25	3200	2300
Гексоген	Латунь	0,02	25	700	
	Сталь 45	0,02	25	1600	2650

перхлората аммония с полистиролом. Для оптической регистрации процесса в оболочки вделывался тонкий прозрачный клин.

Полученные результаты для однородных ВВ малой пористости суммированы в табл. 2 ($L=150 \text{ мм}$, $d=5 \text{ мм}$, $r=500 \text{ мкм}$).

Интересно отметить, что при равной пористости скорости низкоскоростных режимов в одинаковых оболочках для гексогена значительно меньше, чем для тэна.

В табл. 2 приведены значения объемной скорости звука $c_0 = \sqrt{-v^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s}$, которая характеризует скорость распространения возмущений в твердом теле, когда превзойден предел текучести. Кристаллические органические ВВ переходят в текучее состояние при давлении ударной волны порядка 1 кбар. Объемная скорость звука определялась в работе [8] на основе опытов по изотермической сжимаемости [9] и соответствует пористости $m=0$.

Из табл. 2 следует, что скорость низкоскоростного режима существенно зависит от свойств оболочки при сохранении параметров заряда. В случае тэна средняя скорость режима составляет 900 м/сек в плексигласовой оболочке и 3200 м/сек в стальной, что соответственно меньше и больше объемной скорости звука. Поэтому, если характеризовать ВВ объемной скоростью звука, то приходим к формальному выводу о том, что низкоскоростной режим в тэне при поджигании в плексигласовой оболочке, так же как и в гексогене (в латунной, стальной оболочках), является дозвуковым. Однако к этому выводу необходимо относиться осторожно, поскольку область существования низкоскоростных режимов соответствует участку, где происходит трансформация волн сжатия с первоначально пологим фронтом в ударный фронт. Не исключено, что скорость распространения таких волн существенно меньше объемной скорости звука¹. Кроме того, волны сжатия в ВВ могут приводить к нарушению начальной структуры заряда.

Наибольшая скорость низкоскоростного режима для тэна в стальной оболочке равна 3200 м/сек (фотография процесса приведена на

¹ Следует также подчеркнуть, что заряды имели небольшую пористость ($m=0,02$).

рис. 4, а)¹. Данная величина скорости сохраняется, если использовать тэн той же пористости ($m=0,02$; $d=5 \text{ мм}$), но с более мелким размером частиц ($r \approx 20 \text{ мкм}$), или если увеличить диаметр заряда до $d=10 \text{ мм}$. Однако при увеличении диаметра наблюдается переход режима со скоростью 3200 м/сек в детонацию (см. рис. 4, б).

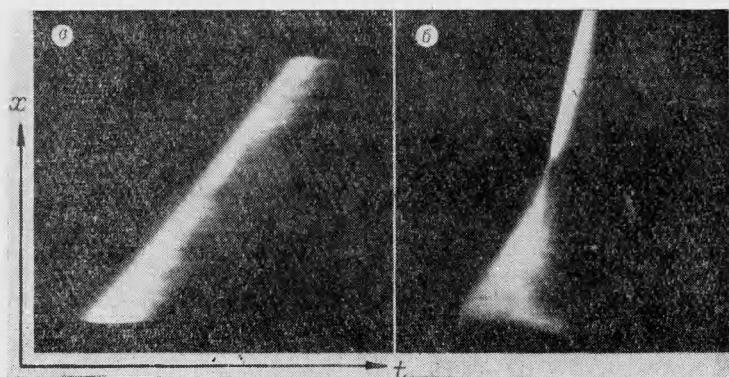


Рис. 4. Фотография процесса, возникающего при поджигании тэна малой пористости ($m=0,02$) в стальной оболочке. Диаметр заряда 5 (а) и 10 мм (б).

При поджигании зарядов тэна ($d=5 \text{ мм}$; $L=150 \text{ мм}$) с пористостью $m>0,02$ в металлических оболочках наблюдается переход в детонацию.

Как отмечалось выше, скорость низкоскоростного режима зависит от давления, которое реализуется в продуктах реакции до разрушения оболочки². Для того, чтобы проследить эту зависимость в широком интервале изменения давления, целесообразно использовать следующий подход. Давление, развивающееся в оболочке, зависит от параметров заряда (диаметра, пористости), свойств (толщины стенки, материала) оболочки и характерного времени нагружения (процесса). Непосредственно определить давления в металлических оболочках трудно из-за высоких значений давлений и больших dp/dt . Однако нижнюю границу значений давлений в оболочке можно получить, если использовать предельные значения пористости, при которых наблюдается возникновение детонации в различных оболочках, и известные из литературы [10] данные о зависимости критического давления инициирования детонации ВВ от пористости³. Определенная таким образом величина давления сопоставлялась со средней скоростью низкоскоростного режима, предшествующего возбуждению детонации в зарядах с предельной пористостью.

Результаты обработки значительного количества опытов, в которых горение переходило в детонацию, выполненных с тэном, суммированы в табл. 3 (длина заряда 150 мм).

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что для заметного увеличения скорости низкоскоростного режима необходимо существенное увеличение давления в оболочке.

¹ Конструкция металлических оболочек была такова, что небольшая ($\sim 5 \text{ мм}$) начальная часть заряда не попадала в поле зрения.

² Опыты, проведенные с участием В. А. Балыкова, показали, что в случае тэна скорость низкоскоростного режима в стальных оболочках с различной толщиной стенки изменяется в широких пределах от 900 до 3200 м/сек.

³ Переход горения в детонацию означает, что формируется ударная волна критической интенсивности, т. е. давление в оболочке не ниже критического.

Максимальное давление в плексигласовой оболочке перед ее разрушением, измеренное пьезоэлектрическим датчиком, близко к величине p_{kp} , соответствующей предельной пористости в этих условиях.

В стальных оболочках была проведена серия опытов со стехиометрической смесью перхлората аммония с полистиролом (размер частиц компонентов 15 мкм, $d=10$ мм). Было установлено, что в случае смесевых ВВ также наблюдаются процессы, распространяющиеся с мало-

Таблица 3

Материал оболочки	Диаметр заряда, мм	Предельная пористость	Средняя скорость низкоскоростного режима, предшествующего возникновению детонации, м/сек	Критическое давление инициирования, соответствующее предельной пористости, кбар	Максимальное (перед разрушением) давление в оболочке по результатам измерения, кбар
Плексиглас	10	0,18	1100	7	6
Латунь	5	0,10	1500	10	—
Сталь	5	0,04	2000	15	—
	10	0,02	3200	—	—

изменяющейся по длине и высокой скоростью. При уменьшении пористости от 0,25 до 0,1 скорость процесса оставалась практически постоянной и составляла 1000–1200 м/сек (при $m < 0,1$ процесс затухает). На рис. 5 показана фотография процесса при $m = 0,25$. Отметим некоторые характерные детали, которые следуют из полученных оптических записей. В большинстве случаев передний светящийся фронт 1, по наклону которого определялась скорость режима, претерпевает излом (показано стрелкой). При этом до точки излома наблюдается существование второго фронта 2, который движется с большей скоростью и догоняет передний фронт 1¹. После точки излома скорость режима меняется незначительно. В ряде опытов часть вещества оставалась непрореагировавшей. Сопоставление с оптической записью указывает на то, что начало ВВ, оставшегося непрореагировавшим, соответствует приблизительно точке излома.

С исследованной смесью не проводились опыты с разъединением заряда ВВ металлической пластиной, поэтому вопрос о том, возникает ли в этом случае низкоскоростной режим и на какой стадии, остается открытым. Существование двух фронтов можно объяснить, предположив, что передний фронт представляет собой фронт проникающих светящихся продуктов горения, а второй 2 — фронт горения (воспламенения).

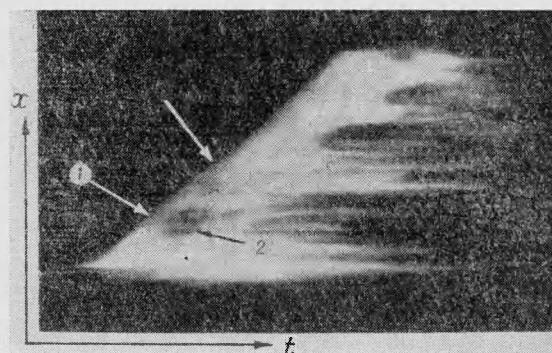


Рис. 5. Фотография процесса, возникающего при поджигании смеси перхлората аммония с полистиролом ($m=0,25$).

¹ Существование двух светящихся фронтов фиксируется и в случае тэна на начальной стадии, предшествующей возникновению низкоскоростного режима (рис. 2, а).

Рассмотрим режим конвективного горения с достаточно гладким фронтом (стадия III, рис. 1). На этой стадии преддетонационного развития существенным является эффект, связанный с расширением внутреннего канала оболочки из-за распирающего действия давления в нем, который приводит к образованию пор в процессе горения впереди его фронта. Предположение о том, что раздвижение оболочки может влиять на развитие взрыва применительно к жидким ВВ, было высказано Боуденом [6]. Полученные результаты указывают на то, что данный эффект определяет развитие процесса на стадии, предшествующей возникновению низкоскоростного режима, и является существенным при горении прежде всего малопористых ВВ. Давление, начиная с которого происходит расширение оболочки, зависит от ее геометрических размеров и физико-механических свойств материала.

В зависимости от характера (скорости) деформирования вещества и оболочки ее расширение вызывает либо отслоение заряда по боковой поверхности с образованием зазора, либо разрушение периферийной части заряда. В обоих случаях процесс развивается в режиме конвективного горения по боковой поверхности заряда.

Опыты, проведенные с единичной порой, когда зазор между оболочкой и сплошным ВВ создавался заранее, показали [2], что при определенных условиях конвективное горение по поре распространяется со скоростями несколько сотен метров в секунду. При этом в поре реализуется давление порядка нескольких килобар. Следует отметить, что такие высокие скорости конвективного горения наблюдаются не только для вторичных ВВ, но и для смесевых порохов, которые являются недетонационноспособными из-за крайне высоких значений критического диаметра детонации [11]. Было показано, что впереди фронта воспламенения (горения) движется фронт продуктов горения.

Следующая серия опытов включала измерение давления пьезоэлектрическим датчиком в канале оболочки, в которой сжигались заряды смеси ПХА с полистиролом при $t \approx 0$. В части опытов смесь была запрессована в тонкостенную ($\delta = 5 \text{ мм}$) стальную оболочку, в другой — применялся вкладной заряд, бронированный по всей поверхности, кроме верхнего торца, и не соприкасающийся непосредственно с толстостенной ($\delta = 20 \text{ мм}$) оболочкой. В последнем случае заряд при горении находился в условиях объемного сжатия. Плотность заряжания сохранилась постоянной. Было установлено, что в случае заряда, запрессованного непосредственно в тонкостенную оболочку, запись $p(t)$ испытывала резкий излом, свидетельствующий об ускорении процесса при $p < 1 \text{ кбар}$. В случае вкладного заряда горение являлось послойным вплоть до давлений в несколько килобар. Данные опыты позволяют объяснить, почему горение зарядов тэнна $m = 0,02$ ($r \approx 20 \text{ мкм}$) являлось послойным в манометрической бомбе¹ [12] до давлений 3 кбар и практически сразу же ускорялось при поджигании тех же зарядов, запрессованных непосредственно в деформируемую оболочку.

Наконец, была проведена серия опытов с тэнном в плексигласовых и стальных оболочках с оптической регистрацией процесса. Постановка опытов была аналогична только что описанным с той только различием, что зазор между вкладным зарядом и оболочкой заполнялся прозрачной жидкостью (глицерином). В плексигласовых оболочках ($\delta = 45 \text{ мм}$) процесс в зарядах тэнна $m = 0,2$ ($d = 5 \text{ мм}, r \approx 500 \text{ мкм}$) затухал после поджигания. В металлических оболочках ($\delta = 25 \text{ мм}$) процесс в зарядах тэнна $m = 0,02$ развивался в начальной стадии со зна-

¹ При горении в манометрической бомбе [12] исследовались вкладные заряды.

чительно меньшим по величине ускорением, чем при непосредственной запрессовке в оболочку (рис. 6).

Таким образом, во всех случаях, когда исключалось проникновение горения по боковой поверхности заряда и затруднялось расширение оболочки, горение заряда было либо послойным (стадия I), либо происходило проникновение по имеющимся в заряде порам (стадия II). Проводимые в настоящее время дополнительные исследования позволяют уточнить картину данного явления в целом.

Перейдем к обсуждению полученных в работе результатов. Преддетонационное развитие горения в пористых ВВ есть сложный многостадийный процесс (см. рис. 1). Режимы, соответствующие стадиям II—IV, хорошо фиксируются также на фотографиях.

Нарушение послойного горения вследствие проникновения газообразных продуктов в поры и возникновение конвективных режимов (стадии II—III) являются начальной и основной причиной ускорения горения. Вынужденная конвекция возбуждает химическую реакцию на данных стадиях преддетонационного развития. Полученные результаты свидетельствуют о том, что конвективная теплопередача в стадии III присуща, по-видимому, не только пористым, но и сплошным (литым) ВВ, в которых образование пор по боковой поверхности заряда происходит в процессе горения вследствие расширения оболочки. Расширение оболочки является закономерным следствием действия высоких давлений, возникающих при переходе горения в детонацию. Тот факт, что на стадиях II—III разъединение заряда тонкими металлическими пластинами приводит к прекращению процесса, свидетельствует об определяющей роли конвективной теплопередачи.

Если природа конвективных режимов горения является достаточно физически ясной, то механизм, по которому возбуждается химическая реакция при низкоскоростном режиме, в настоящее время недостаточно изучен.

Сделанный в работе вывод о том, что скорость низкоскоростного режима зависит от давления в оболочке, позволяет понять следующие факты:

1) незначительное изменение скорости по длине заряда, так как для заметного увеличения скорости в процессе распространения необходимо существенное повышение давления в оболочке, что представляется маловероятным;

2) сильная зависимость скорости от свойств оболочки и дискретный характер этой зависимости. Чем прочнее оболочка, тем более высокое давление возникает в ней. Поэтому в малопрочных (plexiglasовых) оболочках реализуется при поджигании низкая скорость (не выше 1100 м/сек), а в прочных (стальных) оболочках наблюдается более высокая (~ 3000 м/сек) при сохранении параметров заряда практически одинаковыми;

3) переход низкоскоростного режима со слабо возрастающей по длине скоростью в детонацию. Увеличение (даже незначительное) скорости сопровождается ростом давления. В результате возникает

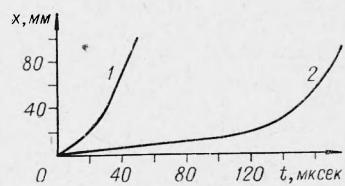


Рис. 6. Схематическое изображение оптических записей процесса, получаемых при поджигании тэна ($m=0,02$; $d=5$ мм) в стальных оболочках, в случае когда:

1 — ВВ непосредственно запрессовано в оболочку; 2 — применялся вкладной заряд, бронированный по боковой поверхности.

система проникающих в ВВ волн сжатия, сложение которых приводит к образованию ударной волны с возрастающей амплитудой.

Поскольку низкоскоростной режим соответствует участку, где происходит формирование ударной волны, то есть основания полагать, что детонация возникает, когда заканчивается трансформация волн сжатия с первоначально пологим фронтом в ударную волну критической интенсивности.

Возникает вопрос, возможно ли устойчивое распространение низкоскоростных режимов. По-видимому, когда при распространении режима давления поддерживается меньше критического p_{kp} , режим может быть устойчивым, несмотря на то, что диаметр заряда d превышает критический диаметр детонации d_{kp} (например, в случае тэна малой пористости, заключенного в длинную малопрочную плексиглавовую оболочку). Кроме того, не исключено, что устойчивые низкоскоростные режимы возможны, когда $d < d_{kp}$ (смесевые системы при малой пористости).

Возвращаясь к рассмотрению схемы перехода горения в детонацию (см. рис. 1), необходимо отметить, что отдельные стадии, указанные на схеме, могут отсутствовать. Так, например, в случае сплошных систем, в которых нет готовых пор, отсутствует стадия II. Возможность существования низкоскоростных режимов IV, возбуждаемых волнами сжатия, установлена для вторичных ВВ. Однако не ясно, возможно ли их существование для смесевых ВВ и порохов. Конвективные режимы могут предшествовать непосредственно возникновению детонации. Вместе с тем независимо от того, является ли определяющей при возбуждении химической реакции конвективная теплопередача или волна сжатия, существуют ограничения, которые делают невозможным беспредельное ускорение процесса в случае недетонационноспособной системы ($d < d_{kp}$ или $p < p_{kp}$) и которые должны приводить к его стабилизации.

Поступила в редакцию
14/III 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ПМТФ, 1963, 5; ФГВ, 1966, 2, 3.
2. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
3. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
4. D. Price, I. F. Wehnelt. Combustion and Flame, 1965, 9, 1.
5. В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ПМТФ, 1965, 2.
6. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.
7. R. Gipson, A. Masek. Eleventh Symposium (International) on Combustion. 1966.
8. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников. ФГВ, 3, 4, 1967.
9. М. Я. Васильев, Д. Б. Балашов, А. Н. Мокроусов. ЖФХ, 1969, 11.
10. N. Lundborg. Explosivstoffe, 1964, 11, 269.
11. W. H. Andersen, R. F. Chaiken. ARSJ, 1961, 31, 10.
12. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ЖФХ, 1963, 37.