

Как видно из (13), глубина прогрева очень мала и при принятых допущениях не зависит от количества тепла, выделившегося вследствие горения в пограничном слое.

С увеличением потока тепла к поверхности увеличивается поток испаряющегося топлива, т. е. параметр B . В таблице приведены значения параметра массообмена B для разных чисел Маха ударной волны; топливо н-тридекан, а окислитель — воздух (кислород).

Окислитель	M_s							
	3	4	5	6	7	8	9	10
Кислород	6	7,4	8,5	10	11,5	13	14,2	16
Воздух	0,22	0,9	1,9	2,5	3,5	4,8	5,9	7,1

Из анализа полученного решения (15) следует, что повышение начального давления приводит к подавлению процесса испарения, в то время как повышение начальной температуры приводит к усилению процесса испарения с поверхности топлива. Частным случаем (15) является формула, полученная Регландом [1]:

$$Bh_L = c_p T_e - c_p T_k + \frac{u_c^2}{2} + c_{1e} \Phi_N \Delta H,$$

которая имеет место при $T_1 = T_k$.

Как видно, для критической температуры кипения топлива, т. е. когда $h_L = 0$, приведенная формула, а следовательно, и допущение автора о равенстве температуры топлива, равновесной температуре кипения по всей толщине пленки, не имеет места.

Поступила в редакцию
28/XI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Регланд. Ракетная техника и космонавтика, 1970, 3.
2. Г. А. Тирский. Докл. АН СССР, 1959, 128.
3. Г. Майрлс. Ударные трубы. М., ИЛ, 1962.
4. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М., «Наука», 1971.
5. Б. М. Будаков, А. А. Самарский, А. Н. Тихонов. Сборник задач по математической физике. М., «Наука», 1972.
6. У. Х. Доренс. Гиперзвуковые течения вязкого газа. М., «Мир», 1966.
7. И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. Таблица интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1971.

УДК 532.593

РАЗЛОЖЕНИЕ ПОРИСТЫХ ВВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

С. А. Колдунов, К. К. Шведов, А. Н. Дремин
(Москва)

Успешное решение многих важных вопросов теории детонации и практического использования взрывчатых веществ (ВВ) зависит от знания процессов их разложения под действием ударных волн различной интенсивности.

Развиваемые с этой целью авторами [1] идеи и методы определения времени разложения ВВ в ударных волнах эффективны, если есть уверенность, что реакция протекает в форме нормального теплового взрыва. Однако заранее характер воспламенения как для различных ВВ, так и для одного и того же вещества в разных агрегатных состояниях не всегда очевиден и должен проверяться. Поэтому представляют интерес поиски простых и надежных методов исследования, лишенных отмеченного недостатка. Это особенно важно для неомогенных (твердых) ВВ, разложение которых, как показали исследования по возбуждению детонации ударными волнами, вследствие развития реакции в отдельных очагах («горячих точках») не носит характера нормального теплового взрыва [2].

В данной работе предлагается методика исследования развития взрывчатого превращения за фронтом ударных волн, которая не связана с какими-либо предварительными допущениями о его характере и поэтому пригодная для различных ВВ с любой структурой заряда.

С помощью предлагаемой методики в работе получены данные о характере энерговыделения под действием ударной волны в ряде ВВ при насыпной плотности заряда и обсуждается возможность использования методики для оценки чувствительности ВВ к ударной волне. Подробно исследовался вопрос о влиянии газовых включений (разогрева газа в порах) на возбуждение и развитие реакции при ударном сжатии малоплотных зарядов.

Методика

Суть методики состоит в получении данных об энерговыделении в ударно сжатом веществе посредством регистрации газодинамических изменений за фронтом ударной волны прямоугольного профиля на границе раздела инертное вещество — реагирующее ВВ.

Образование в процессе реакции газообразных продуктов должно приводить в определенном соответствии со скоростью разложения к до-

К осциллографу

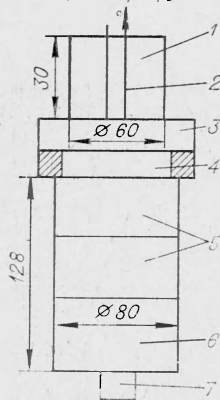


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки для изучения разложения ВВ за фронтом ударной волны прямоугольного профиля.

1 — исследуемое ВВ; 2 — электромагнитный датчик; 3 — инертный барьер; 4 — воздушный зазор; 5 — таблетка активного заряда; 6 — взрывная линза; 7 — таблетка под ЭД.

полнительному повышению давления, воздействию которого испытывает инертная среда, контактирующая с исследуемым ВВ. Характер повышения давления на границе раздела и обусловленное им торможение этой границы можно зарегистрировать, применяя соответствующие датчики — давления и массовой скорости. В настоящей работе электромагнитным методом измерялась массовая скорость движения границы раздела $u(t)$.

Использование ударных волн прямоугольного профиля обеспечивает неизменность внешних условий и позволяет наглядно проследить изменения в характере движения границы раздела, обусловленные собственно энерговыделением.

Ударные волны прямоугольного профиля генерировались методом «воздушного зазора». Схема эксперимента с некоторыми характерными размерами дана на рис. 1.

Различные амплитуды ударных волн с конечным участком постоянства потока (τ_n) были получены варьированием величины воздушного зазора (h), толщины (d) инертного барьера, а также изменением материала барьера и ВВ активного заряда.

Таблица 1

Номер генератора ударной волны	Активный заряд	h, мм	Материал барьера и d, мм	Параметры волны		τ_p , мкс
				u, км/с	ρ , кбар	
1	ТНТ 50 тальк 50	16	Текстолит 20	0,43	16,5	$\approx 4,5$
2		Парафин 20	0,56	$\approx 4,5$		
3	$\rho_0 = 1,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	10	Парафин 15	0,77	25,5	≈ 4
4	ТНТ $\rho_0 = 1,41 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	16	Парафин 15	1,35	61	≈ 3

В табл. 1 представлены соответствующие характеристики генераторов ударных волн (УВ) прямоугольного профиля и характеристики самих волн, используемых в работе.

На рис. 2 приведены осциллограммы записи $u(t)$, полученные при постановке датчика на границе раздела в случае, когда с барьером контактировало инертное вещество и ВВ. Видно, что записи $u(t)$ имеют отличия, обусловленные торможением границы раздела продуктами разложения ВВ. Эффект торможения выражен тем сильнее, чем больше интенсивность нагружения и чувствительнее заряд данного ВВ к ударной волне. Используя эти предварительные результаты, были проведены исследования для более широкого класса ВВ, отличных по своей чувствительности к ударным волнам.

Исследование характера разложения ВВ в ударных волнах при насыпной плотности заряда

Эксперименты выполнены в следующих ВВ: аммиачная селитра ($\rho_0 = 0,86 \text{ г/см}^3$), размер зерна ($\delta = 0,15 \div 0,65$), ТНТ ($\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$, гранулированный, $\delta = 2 \text{ мм}$), тетрил ($\rho_0 = 0,84 \text{ г/см}^3$, $\delta = 0,15 \text{ мм}$), гексоген ($\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$, $\delta = 1 \text{ мм}$) и тэн ($\rho_0 = 0,82 \text{ г/см}^3$, $\delta = 0,5 \text{ мм}$).

Осциллограммы записи $u(t)$ торможения границы раздела приводятся на рис. 3 (см. также рис. 2).

Анализ результатов, полученных в различных зарядах ВВ, удобно провести по относительному изменению скорости движения границы $u(t)/u_0$, где $u(t)$ — текущее значение массовой скорости, u_0 — массовая скорость на фронте волны в ВВ, t — время, отсчитываемое от момента начала движения датчика, т. е. момента выхода фронта на границу раздела инертный

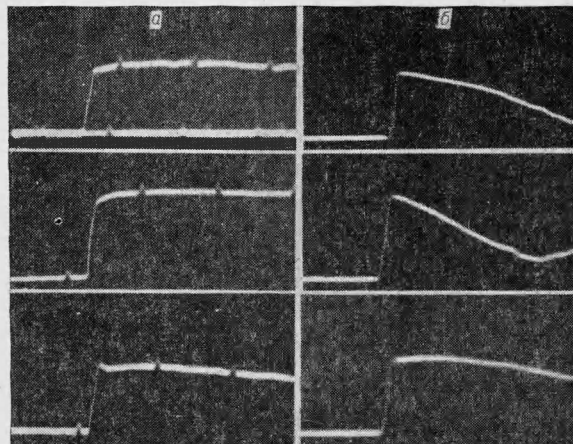


Рис. 2. Осциллограммы записи движения границы раздела. Вещество, контактирующее с парафиновым барьером (сверху вниз):

а) NaCl (генератор УВ № 2 и № 3), парафин (генератор УВ № 3); б) тетрил (генератор УВ № 2 и № 3), водонаполненный тетрил (генератор УВ № 3) (между метками времени 2 мкс).

барьер — ВВ. Величина u_0 определялась экстраполяцией записи $u(t)$ к $t=0$. При таком способе представления результатов кривые торможения выходят из одной точки $u(t)/u_0=1$ и данные сопоставимы для различных ВВ и амплитуды волны независимо от условий регистрации (чувствительности осциллографа, временной развертки). Кривые $u(t)/u_0$ для исследованных зарядов ВВ, представляющие собой усреднение записи $u(t)$ по 3—4 опытам, приведены на рис. 4.

Максимальный разброс в опытах величины $u(t)/u_0$ от средних значений, описываемых кривыми рис. 4, не превышал 1—2% на начальных участках изменения $u(t)/u_0$ ($0 \leq t \leq 1 \div 1,5$ мкс), на участках заметного спада (торможения) скорости отклонения достигали в отдельных измерениях 10÷15%. Менее точно (с разбросом около 50%) описываются данные на конечных участках записи. При этом разброс в опытах по времени для заданного на кривой значения $u(t)/u_0$ не превышал 10%.

Если охарактеризовать энерговыделение в ВВ величиной $u(t)/u_0$, взятой в некоторый определенный момент времени, например при $t=2$ мкс, то получим ряд (см. табл. 2), последовательность расположения исследованных ВВ в котором совпадает с направлением изменения чувствительности к ударным волнам этих ВВ (определяемой по величине критического барьера) и с рядом чувствительности к удару в испытаниях на копрах [4]. Величину $u(t)/u_0$ при $t=\text{const}$, выбранную соответствующим образом, очевидно, можно рассматривать как некоторый относительный количественный критерий, определяющий положение ВВ в ряду чувствительности к ударной волне.

Получаемый из предлагаемой методики исследования характера энерговыделения в зарядах различной структуры способ оценки чувствительности позволяет стандартизировать испытания, задаваясь определенной амплитудой падающей волны (интенсивностью внешнего воздействия) и материалом среды, контактирующей с исследуемым ВВ.

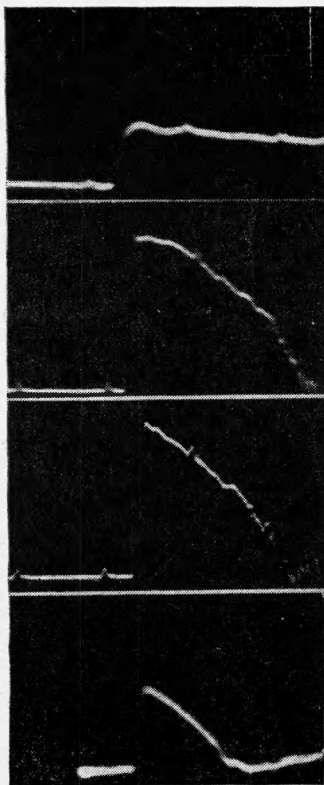


Рис. 3. Осциллограммы записи движения границы раздела парафин — ВВ. Исследуемое ВВ (сверху вниз): тротил (генератор УВ № 2), гексоген (генератор УВ № 2 и № 3), тэн (генератор УВ № 2). (Между метками времени 2 мкс. Осциллограммы для разных ВВ получены при различной чувствительности осциллографа.)

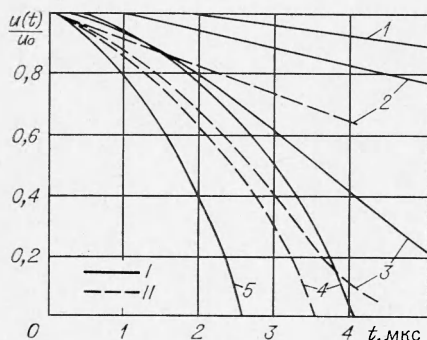


Рис. 4. Торможение границы раздела продуктами разложения ВВ.

I — генератор УВ № 2, II — генератор УВ № 3.
 1 — аммиачная селитра, $u_0=0,81$ км/с, $p=13,5$ кбар; 2 — ТНТ, $u_0=0,74$ км/с, $p=10,5$ и $u_0=1,63$ км/с, $p=46$ кбар (генератор УВ № 4); 3 — тетрил, $u_0=0,78$ км/с, $p=11$ кбар и $u_0=0,89$ км/с, $p=15$ кбар; 4 — гексоген, $u_0=0,75$ км/с, $p=14,5$ кбар и $u_0=0,9$ км/с, $p=20$ кбар; 5 — тэн, $u_0=0,78$ км/с, $p=11,5$ кбар (давления ударного сжатия получены с помощью ударных адиабат пористых ВВ [3]).

Таблица 2

Генератор УВ	Аммиачная селитра	ТНТ	Тетрил	Гексоген	Тэп
2	0,99	0,94	0,79	0,76	0,39
3	—	0,82*	0,68	0,62	—

* Генератор УВ № 4.

В этом смысле имеется определенная аналогия с испытаниями на копрах чувствительности вторичных ВВ к удару (одинаковая энергия удара).

Дальнейшие исследования ВВ с различной структурой заряда (насыпной, прессованной, литой) должны показать, в какой степени рекомендуемый способ может быть стандартизирован с точки зрения количественной оценки чувствительности к ударной волне.

Исследование влияния газа в порах на чувствительность ВВ к ударным волнам

Одно из первых и достаточно распространенных объяснений повышения чувствительности к ударным волнам с уменьшением плотности ρ_0 заряда сводилось к возможности воспламенения зерен ВВ разогретыми до высоких температур воздушными включениями [5—9].

Основная идея непосредственной экспериментальной проверки этой точки зрения заключалась в выяснении влияния на соответствующие процессы замены природы газа в порах и увеличения начального давления газа p_0 , что рассматривалось как способ изменения степени разогрева газовых включений при ударном сжатии, а следовательно, и их воспламеняющей способности.

Найденное уменьшение скорости и затухание низкоскоростного режима детонации с повышением p_0 [8,9], а также замеченное влияние на скорость природы газа в порах [10] рассматривались как убедительное доказательство действия механизма воспламенения зерен ВВ разогретыми газовыми включениями.

Однако аналогичные исследования при инициировании детонации ударными волнами не обнаруживали влияния замены природы газа [11] и увеличения его начального давления p_0 в порах [12,13] на характеристики перехода в детонацию. Наблюдаемое же с повышением p_0 падение чувствительности [12] (уменьшение критической толщины инертного барьера, обеспечивающей в условиях опыта 50% возбуждения детонации) в целом вообще было истолковано в том смысле, что газ в порах действует как десенсибилизирующий фактор.

В то же время имеются данные, согласно которым вакуумирование зарядов, по крайней мере, не приводило к изменению критической толщины барьера [14], а также не влияло на величину переходной области [11].

Не вдаваясь в детали известной противоречивости в получаемых результатах и их трактовке, заметим, что исследование роли того или иного фактора в механизме возбуждения и развитии собственно разложения ВВ по характеристикам процесса как целого (величине малой скорости детонации, протяженности переходной области и т. д.) не является достаточно корректным.

Изменение природы газа в порах и особенно повышение начального давления наряду с возможным влиянием собственно на инициирование и развитие химического разложения может проявиться на процессе в целом через изменение, например, гидродинамических свойств среды,

которые в известной степени определяют потери и поступления энергии на ударный фронт при формировании детонационной волны. Поэтому о роли того или иного фактора в возбуждении и развитии собственно реакции, вероятно, наиболее правильно судить, получая информацию о разложении слоя ударно сжатого вещества, по возможности не связываясь с процессами формирования и распространения детонационных режимов.

В данной работе изучалось разложение в ударных волнах тротила, тетрила и гексогена с различными газами в порах (CO_2 , аргон). Выяснялось влияние повышения начального давления p_0 газа в порах до $10 \div 12$ атм. С зарядами гексогена были проведены также эксперименты с заменой газов в порах и вакуумирование на пределах возбуждения детонации в обычных экспериментах по инициированию через инертную преграду.

Эксперимент и обсуждение результатов

В опытах с прямоугольными волнами при начальном атмосферном давлении газа в порах исследуемое ВВ засыпалось в стеклянную оболочку с толщиной стенок 1 мм. Высота засыпки составляла 30—35 мм. В опытах под давлением основу оболочки составлял стакан из текстолита (или эбонита) с толщиной стенок и дна 12 мм и внутренним диаметром 40 мм. Герметизация сборок в обоих случаях осуществлялась заливкой открытого торца церезином и эпоксидной смолой. Заполнение пор исследуемых зарядов аргоном и CO_2 производилась продувкой (вытеснением воздуха) соответствующим газом (гранулированный тротил), вакуумированием ($\approx 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) с последующей продувкой либо без нее (тетрил, гексоген). Давление газа в порах заряда гексогена повышалось непосредственно на месте подрыва из баллона через металлический патрубок, соединенный со сборкой.

Эксперименты с газами в порах при $p_0 = 1$ атм были выполнены, используя генератор ударных волн прямоугольного профиля № 2 и № 3. Осциллограммы записей $u(t)$ торможения границы раздела с аргоном и CO_2 в порах аналогичны для соответствующих зарядов и амплитуды падающей волны, когда в порах находился воздух (см. рис. 3).

В опытах с повышенным начальным давлением газа в порах использовался генератор УВ № 1. В этом случае дно стакана составляло часть необходимой толщины текстолитового барьера. (Для сравнения в этих же условиях были выполнены эксперименты при $p_0 = 1$ атм.) Осциллограммы записи $u(t)$ в зарядах гексогена с аргоном и CO_2 в порах при $p_0 = 10 \div 12$ атм приведены на рис. 5.

Результаты экспериментов по выяснению влияния газа в порах на развитие энерговыделения представлены табл. 3. Соответствующие значения $u(t)/u_0$ являются средними величинами, полученными при

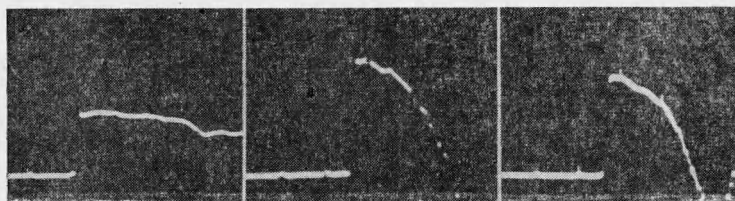


Рис. 5. Осциллограммы записи движения границы раздела текстолит — парафин (а) и текстолит — гексоген с CO_2 (б) и воздухом (в) в порах; газ под давлением $10 \div 12$ атм; генератор УВ № 1 (между метками 2 мкс).

Таблица 3

t , мкс	ТНТ*			Тетрил			Гексоген		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Генератор УВ № 2									
1	0,99	0,99	0,99	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94
2	0,94	0,95	0,95	0,79	0,80	0,78	0,76	0,77	0,77
3	0,89	0,91	0,9	0,6	0,62	0,6	0,48	0,50	0,54
4	0,87	0,87	0,86	0,4	0,36	0,43	0,05	0,1	0,18
Генератор УВ № 3**									
0,5	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94
1	0,92	0,92	0,93	0,88	0,88	0,88	0,85	0,86	0,84
2	0,82	0,85	0,86	0,68	0,68	0,69	0,62	0,63	0,61
3	0,74	0,78	0,80	0,38	0,44	0,4	0,31	0,32	0,28

* I — воздух, II — аргон, III — CO₂.

** Данные для ТНТ получены при использовании генератора УВ № 4.

обработке осциллограмм $u(t)$ 4-х опытов. Были выполнены также по два измерения $u(t)$ для каждой амплитуды с вакуумированными ($\approx 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) зарядами тетрила. Эти измерения укладывались в результаты для тетрила с различными газами.

Данные для $u(t)/u_0$ в зарядах гексогена при повышенном начальном давлении газа в порах представлены на рис. 6 экспериментальными точками (без усреднения), снятыми непосредственно с осциллограмм $u(t)$. Для удобства обозрения значения $u(t)/u_0$ в разных условиях эксперимента нанесены в различные моменты времени t . Штриховая кривая отражает общий характер изменения $u(t)/u_0$ для данной амплитуды ударного сжатия.

Как видно из представленных результатов, влияние замены воздуха в порах на CO₂ и аргон, а также повышение начального давления газа в порах, по крайней мере, до 10–12 атм не приводит для исследованных зарядов ВВ и амплитуд ударных волн к изменению торможения границы раздела, а следовательно, не вносит изменений в интенсивность энерговыделения, регистрируемого данной методикой. Некоторые отличия в величинах $u(t)/u_0$, приведенных в табл. 3, особенно заметные на участке $u(t)/u_0 \rightarrow 0$, в основном следует связывать с ограниченным количеством измерений, поскольку эти отличия укладываются в разброс экспериментальных данных. Гораздо заметнее проявляется отличие $u(t)/u_0$ при изменении только амплитуды ударной волны. (Заметим попутно, что фактически не обнаруживалось влияние природы газа в порах и повышение p_0 до 10–12 атм на величину массовой скорости u_0 , при определении которой разброс от средних значений не превышал ± 2 .)

Расчет температуры адиабатического разогрева газа по формуле $T = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\gamma/\gamma-1}$ с учетом возможного

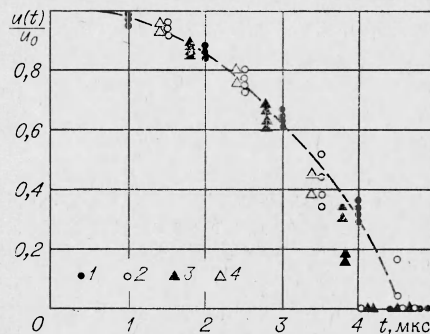


Рис. 6. Торможение границы раздела текстолит — гексоген продуктами разложения ВВ. Давление в ударной волне в гексогене 9 кбар, $u_0 = 0,58$ км/с.

В порах воздух: 1 — $p_0 = 10 \div 12$ атм, 2 — $p_0 = 1$ атм; в порах CO₂: 3 — $p_0 = 10 \div 12$ атм; 4 — $p_0 = 1$ атм.

изменения показателя γ [15], а также результаты работы [16] показывают, что в исследованной области перепада давлений $p/p_0=10^3\div 10^4$ заменой газов в порах и изменением давления p_0 удается в принципе охватить температурный интервал от 1000 до 10 000°С. Наименьший разогрев при этом соответствует двуокиси углерода ($\gamma=1,17\div 1,2$ [15]), величина которого при $p/p_0=10^4$ близка к 1000°С, а при $p/p_0=10^3$, ниже на 100—200°С. В равных условиях сжатия разогрев аргона отличается практически на порядок ($\gamma=1,67$). Разогрев воздушных включений (особенно при малых p/p_0) близок к разогреву CO_2 и отличается в зависимости от величины p/p_0 , очевидно, не более чем на 500—1000°С.

По ряду причин провести достаточно надежные оценки времени поджигания ВВ нагретым газом в условиях ударного сжатия порошкообразного заряда довольно трудно. Однако с некоторыми допущениями это можно сделать, используя результаты работы [17], где задача о воспламенении реакционной среды инертным очагом разогрева решалась на ЭВМ.

Для оценок принималось, что исходный газ при ударном сжатии заряда целиком остается («запечатывается») в поре и степень сжатия исходного газа $\frac{p}{p_0} \sim 10^3$. Использовались известные значения энергии активации и предэкспонента для распада ВВ, определяемые в обычных условиях, а также соответствующие значения теплофизических констант газа и ВВ. Было найдено, что для сжатых газовых включений, разогретых до 1000°С и имеющих размеры, заключенные в интервале 10^{-2} — 10^{-5} см, времена задержки воспламенения ВВ у поверхности раздела могут составить соответственно от 10^{-10} до 10^{-5} с. Эти значения, в принципе, охватывают времена как выходящие за пределы разрешения (меньше времени сжатия), так и вообще превышающие в нашем случае время экспериментального наблюдения процесса.

При температурах разогрева около 10⁴°С и выше, которым в наших условиях отвечал бы разогрев в порах аргона, воспламенение ВВ должно осуществляться в режиме вынужденного зажигания [18].

С изменением температуры разогрева фиксированной массы газа в поре естественно изменяется запас тепла. Кроме того, запас тепла в источнике в экспериментах изменялся на порядок в большую или меньшую сторону изменением массы разогреваемого газа (соответственно повышением или уменьшением начального давления газа в порах). Отсутствие влияния на интенсивность энерговыделения различия на порядок таких важных факторов для воспламенения (его характера и возможности распространения), как температура и запас тепла источника, позволяет, учитывая проведенные выше оценки, высказать следующие соображения. Либо воспламенение должно носить характер ограниченной вспышки, не рождающей фронта реакции (горения), и малоэффективной с энергетической точки зрения, либо возможность воспламенения сжатым газовым включением в порошкообразных зарядах вообще не реализуется, по крайней мере, за времена наблюдения процесса (4—5 мкс).

В этой связи необходимо отметить, что полученные в оценках порядки величины задержки воспламенения (в частности, 10^{-10} — 10^{-7} с), очевидно, вообще не отвечают действительной картине вследствие существенной идеализации (исходный газ целиком остается в поре, нет попадания вещества в пору и др.) и были сделаны для заранее существующего очага, т. е. без учета самого процесса сжатия и кинетики разогрева газа. В реальном случае ударного сжатия порошкообразного заряда малой плотности, вероятно, не весь газ (не вся масса газа) остается

в исходной поре, происходит его выдавливание и перераспределение вследствие дробления частиц и истечения вещества в поры.

Непосредственным экспериментальным результатом, отрицающим эффективность механизма поджигания зерен газовыми включениями, является установленный в работе факт, что энерговыделение сразу за ударным фронтом оказывается чувствительным к сравнительно малому изменению только интенсивности волны, когда собственно разогрев газа в порах изменяется мало или, по крайней мере, остается в пределах интервала изменения температур, достигаемого заменой газов в порах заряда. Если бы все определялось разогретым газом и было за пределами, то небольшие изменения амплитуды ударной волны не сказывались бы на разложении ВВ, так как сам разогрев газа уже достаточно высок для воспламенения.

На вопрос о возможности воспламенения зерен разогретым газом в любом случае за времена, сравнимые с временем сжатия (запределение), могут также дать ответ опыты с различными газами в порах на пределах возбуждения детонации.

Было найдено, что от активного заряда диаметром 80 мм, состоящего из взрывной линзы и двух таблеток из смеси ТНК+талък 30/70 ($\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$) высотой 40 мм каждая, детонация в исследуемом заряде гексогена (оболочка стеклянная, высота засыпки $70 \div 80$ мм) возбуждается всегда (+) через слой прессованного BaNO_3 ($\rho_0 = 2,8 \text{ г/см}^3$) толщиной 30 мм и не возбуждается (—) при толщине слоя 35 мм. Факт детонации регистрировался с помощью СФР. Параметры волны в гексогене (массовая скорость u и волновая скорость D) определялись электромагнитным методом. Инициированию детонации в условиях эксперимента отвечает рассчитанное давление в волне $p_+ = 2,1$ кбар ($u = 0,3$ км/с, $D = 0,70$ км/с), случаю отказов — $p_- = 11$ кбар ($u = 0,25$ км/с, $D = 0,45$ км/с). Заметим, что значительные завалы переднего фронта осциллограмм (достигавшие 3 мкс), а также величины скоростей D позволяют считать, что фактически рассматривается волна сжатия.

Поскольку преграда, ослабляющая волну, обладала конечной пористостью и не позволяла производить откачку воздуха для последующего заполнения пор соответствующим газом, то между преградой и гексогеном прокладывался слой плексигласа толщиной 1 мм. В этом случае эвакуация воздуха была возможна (и производилась до $3 \div 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.), а добавление плексигласа не повлияло на найденные пределы возбуждения детонации. Указанная степень вакуума сохранялась в течение 30 мин, превышая время эксперимента.

При p_+ опыты проводились с зарядом, поры которого были заполнены CO_2 (разогрев меньше, чем разогрев воздуха и можно было ожидать отказы), при p_- в порах находился аргон (максимальный разогрев и ожидалась детонация). С вакуумированными зарядами эксперименты выполнялись при p_- и p_+ . Несмотря на различия фактически на порядок температур разогрева и запаса тепла в сжатом включении газа, не было обнаружено, чтобы в условиях эксперимента замена газов в порах и вакуумирование повлияли на найденные пределы возбуждения детонации и на развитие процесса, наблюдаемого фотографически (имело место более сильное свечение только в опытах с аргонном и с вакуумированными зарядами).

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты показывают, что разогрев газа в порах не является основной причиной возбуждения и развития реакции в условиях инициирования детонации ударными волнами и не определяет рост чувствительности ВВ к ударной волне с уменьшением начальной плотности заряда.

Следовательно, если исходить из тепловой природы инициирования, то необходимо сделать вывод, что энерговыделение сразу или вблизи

ударного фронта (которое собственно и обеспечивает развитие детонации [2, 19]) является следствием локальных разогревов, возникающих непосредственно в веществе, а присутствие пор, очевидно, способствует локальной диссипации энергии ударного сжатия, ведущей к образованию эффективных очагов разложения.

Поступила в редакцию
8/XII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Д. Марголин. Докл. АН СССР, 1966, **167**, 3.
2. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20. М., «Недра», 1967.
3. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, О. С. Авдонин. ФГВ, 1970, **6**, 4.
4. А. Масек. Chem. Rev., 1962, **62**, 41.
5. Е. Бюрло. Детонация через влияние. Изд. Артакадемии, 1934.
6. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Г. И. Шехтер. Физика взрыва, М., Физматгиз, 1959.
7. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1961, **140**, 1.
8. F. P. Bowden, H. T. Williams. Research, 1951, **4**, 7, 339.
9. Ф. Боуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах. М., ИЛ, 1962.
10. T. L. Gottrell, J. G. Gibs. Nature, 1956, **178**, 814.
11. G. E. Seay, L. B. Seely. J. Appl. Phys., 1961, **32**, 6.
12. M. C. Chick. 4-th Symposium (International) on Detonation, 1953, p. 349.
13. W. W. Marshall. 5-th Symposium (International) on Detonation, 1955, p. 157.
14. G. P. Sachia, E. G. Whitbread. Proc. Roy. Soc., 1958, **A246**, 268.
15. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1966.
16. Ю. Н. Рябинин. Газы при больших плотностях и высоких температурах. М., Физматгиз, 1959.
17. У. И. Гольдшлегер, К. П. Прибыткова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1973, **9**, 1.
18. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ИФЖ, 1965, **IX**, 2.
19. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ФГВ, 1971, **8**, 1.

УДК 622.215.1

К ВОПРОСУ О СТРУКТУРЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В МАЛОПЛОТНЫХ ЗАРЯДАХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

В. Г. Хотин, В. А. Пономарев
(Москва)

При стационарном распространении детонации гидродинамическая теория [1] предсказывает наличие за ударным фронтом зоны повышенного давления — химпика в области химической реакции, и следующей за ним области относительно медленного изменения параметров под воздействием волны разгрузки. В трехмерном случае распределение параметров по длине заряда в детонационной волне значительно усложняется, так как приходится учитывать влияние боковых волн разгрузки.

Наиболее простой вариант схемы гидродинамических течений за фронтом детонационной волны был предложен в [2] и получил дальнейшее развитие в [3] (так называемая геометрическая модель). Согласно этой модели, за плоским детонационным фронтом должна существовать