

ГЛАДКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА В ЖИДКОМ ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ

Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер,
Г. В. Кришкевич, К. Б. Юшко
(Москва)

Теоретически рассмотрена [1—3] и экспериментально выявлена (в газах [4]) неустойчивость одномерного режима [5] детонационной волны. Поверхность фронта является негладкой из-за наличия локальных очагов химической реакции.

В некоторых жидких прозрачных ВВ (ЖВВ) микроструктура детонационной волны обнаружена [6, 7] путем фотографирования ее собственного свечения. Минимальный размер неоднородностей, зарегистрированный в [7], ~ 1 мм (на пределе разрешения метода регистрации).

Существенно большее разрешение имеет метод отражения света [8], в котором регистрируется отражение видимого ($\lambda \sim 5000 \text{ \AA}$) света от фронта ударной волны в прозрачных средах. Ударный фронт представляет собой тонкую ($\sim 10^{-6}$ см) границу раздела сжатого и несжатого вещества; в инертных средах исследование отражательной способности фронта ударных волн свидетельствует также об их высокой степени гладкости (зеркальности). Коэффициент отражения света R от такого фронта соответствует рассчитанному по формулам Френеля.

По изменению картины отражения по сравнению с реперным (отражением от гладкого фронта) можно судить о шероховатости фронта ударной волны. В рамках геометрической оптики правильное (зеркальное) отражение говорит об отсутствии шероховатостей на фронте $\gg \lambda$ падающего света.

При наличии шероховатостей на фронте, сравнимых с λ , рассмотрение отражения света в рамках волновой оптики [9] приводит к следующей зависимости интенсивности зеркального отражения $I_{\text{зер}}$ от шероховатости фронта Δz :

$$I_{\text{зер}} = I_{\text{зерк}} \exp(-4 k^2 \overline{\Delta z^2} \cos^2 \alpha_0),$$

где $I_{\text{зерк}}$ — интенсивность отражения от гладкой поверхности; α_0 — угол падения света на ударный фронт.

Уменьшение интенсивности зеркального отражения от шероховатой поверхности сопровождается появлением диффузного отражения.

В зависимости от степени шероховатости характер отражения света и его интенсивность меняются:

1. $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} \ll \lambda/4\pi$ — имеем гладкую поверхность, отражающую по Френелю;
2. $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} \sim \lambda/4\pi$ — наряду с зеркальным появляется диффузное отражение, интенсивность зеркального меньше френелевского;
3. $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} \gg \lambda/4\pi$ — при случайном характере зеркальное отражение экспоненциально мало, отражение практически целиком диффузное.

Когда $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} \sim \lambda/4\pi$, средний период \bar{h} шероховатостей вдоль отражающей поверхности определяется как [9]

$$\bar{h} = \text{const} \frac{\lambda \int_0^{x_0} I_{\text{диф}}(x) dx}{\cos \alpha_0 \int_0^{x_0} I_{\text{диф}}(x) x \cdot dx},$$

где $I_{\text{диф}}$ — интенсивность диффузно отраженного света в плоскости падения.

В принципе измерения интенсивности $I_{\text{шер}}$ и зависимости $I_{\text{диф}}$ от угла ($I_{\text{диф}}(x)$) дает полную характеристику возмущений на отражающей поверхности. Разрешающая способность метода позволяет установить наличие неоднородностей размером $\geq 2 \cdot 10^{-6}$ см, что вряд ли достижимо другими способами.

Экспериментально исследовалась прозрачная жидкая взрывчатая смесь концентрированной азотной кислоты $\rho_4^{10} = 1,523$ г/см³ и дихлорэтана $\rho_4^{20} = 1,257$ г/см³. На рис. 1 представлена схема эксперимента. Смесь, залитая в кювету (рис. 2, а), контактирует со стеклом, имеющим показатель преломления $n = 1,755$, заметно отличающийся от показателя преломления ЖВВ ($n = 1,42$). Свет, попадая в кювету через щель S , отражается

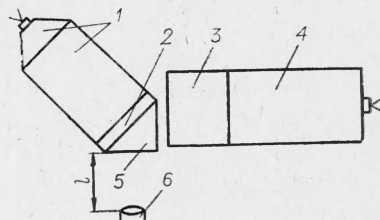


Рис. 1. Схема эксперимента.

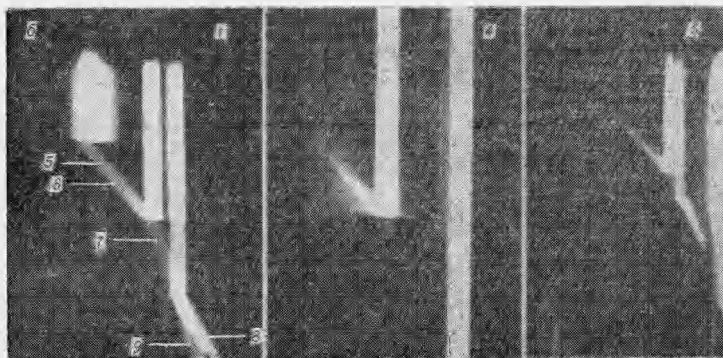
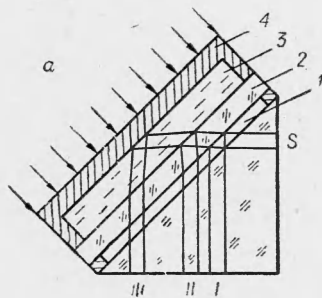
1 — заряд ВВ с линзой для создания плоской детонационной волны; 2 — алюминиевая кювета; 3 — стакан с аргоном; 4 — заряд ВВ; 5 — призма из оргстекла, $n = 1,47$; 6 — объектив СФР.

как от неподвижных (рис. 2, а, лучи I, II, III), так и от движущихся (детонационный фронт, ударные волны в инертных прозрачных средах) оптических границ и через вторую грань призмы выходит в направлении объектива фотохронографа.

На рис. 2, б приведена фотохронограмма опыта для смеси 60/40, начальная температура -2° , инициирующий заряд ТГ 50/50, измеренные скорости детонации $6,2 \pm 0,1$ км/сек, коэффициент отражения

Рис. 2. Отражение света (I, II, III) от оптических границ:

а) 1 — толуол, 2 — свинцовое стекло, 3 — свинцовое стекло — ЖВВ, 4 — дно алюминиевой кюветы; б) 5 — отражение света от детонационного фронта; 6 — собственное свечение детонационного фронта; 7 — отражение света от ударной волны в стекле ТФ-5; 8 — отражение света от ударной волны, распространяющейся последовательно в толуоле и оргстекле (оптическая граница толуол-оргстекло с относительным показателем преломления ~ 1 практически не отражает); 9 — отражение света от движущейся границы толуол — свинцовое стекло. (Номера кадров соответствуют номерам опытов по таблице).



$R = 1,7 \pm 0,1\%$, коэффициент отражения же, рассчитанный по показателю преломления n сжатой смеси (в предположении линейной зависимости n от ρ) и известному показателю преломления перед фронтом, оказался равным $1,6\%$. Полученные результаты приведены в таблице.

Номер опыта	Состав смеси	Иницирующий заряд, его состав, диаметр и длина (мм)	d	$\frac{L}{d}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\frac{D}{\text{см}}$	p_x , кбар	$\frac{u_{\text{п}}}{u_{\text{ж}}}$	$\frac{I_{\text{шер}}}{I_{\text{зерк}}}$	$(\overline{\Delta z^2})^{1/2}, \mu$	\bar{h}, μ
1	60/40	ТГ 50/50 120×220	100	0,15	-9	6,2	230	1,3	1	<0,02	—
3	60/40	ТГ 50/50 120×220	100	0,15	-20	6,2	230	1,3	0,08	0,090	5,7
4	60/40	ТГ 50/50 120×30	60	6	+5	6,2	220	1	0,06	0,095	5,0
5	30/70	ТГ 50/50 120×220	100	0,15	+15	5,6	170	—	0,27	0,065	6,5
6	75/25	ТГ 50/50 120×220	100	0,15	+8	5,8	200	—	<0,01	>0,12	10,5

Примечание. L/d — отношение длины заряда ЖВВ к диаметру; t — начальная температура смеси; p_x — давление в химике; $u_{\text{п}}/u_{\text{ж}}$ — скорость поршня по отношению к скорости ПВ в точке Жуге.

Шероховатость $(\overline{\Delta z^2})^{1/2}$ и ее средний период \bar{h} определялись исходя из полученной картины отражения (см. рис. 2 и 3).

Полученные экспериментальные данные говорят о том, что фронт ударной волны в детонирующей жидкости не является идеально зеркальным. Не исключено, что в опытах со слегка пересжатой детонационной волной (см. таблицу, опыт 1) фронт шероховат с $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} < 0,02 \mu$, и шероховатости не могут быть обнаружены даже оптическим методом по уменьшению интенсивности отражения. Снижение начальной темпе-

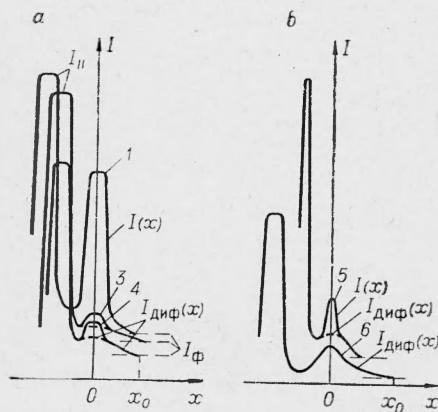


Рис. 3. Микрофотометрический разрез фотохронограмм (см. рис. 2) в момент детонации смеси ЖВВ (обозначения кривых соответствуют номерам опытов по таблице). $I_{\text{п}}$ — интенсивность света, отраженного от реперной границы стекло ТФ-5/ЖВВ; $I(x)$ — интенсивность света, отраженного от детонационного фронта; $I_{\text{диф}}(x)$ — интенсивность диффузно отраженного света; $I_{\text{шер}} = I(x)_{\text{max}} - I_{\text{диф}}(x)_{\text{max}}$; $I_{\text{зерк}} = \text{const} + I_{\text{п}}$; $I_{\text{ф}}$ — интенсивность собственного свечения детонации.

ратуры стехиометрической смеси до -20° , уход от стехиометрии, переход к непересжатой детонации приводят к появлению неоднородностей на детонационном фронте $(\overline{\Delta z^2})^{1/2} \sim 0,1 \mu$. Разрешающая способность эксперимента не позволяет установить, есть ли в наборе углов $\bar{\alpha} = (\overline{\Delta z^2})^{1/2} / \frac{1}{2} \bar{h} \sim 1^\circ$ такие, которые могли бы привести к горячим точкам, т. е. к пульсирующей детонации.

В настоящее время возможны две трактовки опытов:

1. Либо мы имеем дело с картиной, в принципе аналогичной той, которая наблюдалась ранее для газовой детонации [4], где в смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$ минимальный масштаб был (вдоль фронта) 10^{-2} см. Считая этот масштаб обратно пропорциональным плотности, получим 10^{-5} см для конденсированных ВВ, т. е. даже меньше, чем в наших опытах.

Подобные неоднородности на детонационном фронте в конденсированных ВВ не могли быть выявлены фотохронографическим методом [7] из-за его малой разрешающей способности.

2. Либо неоднородности возникают в зоне химической реакции и вызывают неоднородность фронта ударной волны (в силу дозвуковой скорости в области между волной и зоной реакции). Но эта неоднородность фронта не оказывает заметного обратного влияния на реакцию.

Поступила в редакцию
18/X 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Шелкин. ЖЭТФ, 1959, 36, 600.
2. В. В. Пухначев. Докл. АН СССР, 1963, 149, 798.
3. Р. М. Зайдель, Я. Б. Зельдович, ПМТФ, 1963, 6, 59.
4. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125, 1.
5. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1940, 10, 542.
6. А. Н. Дремин, Г. А. Ададунов, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1960, 133, 1372.
7. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, 139, 137.
8. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1961, 138, 1333.
9. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1966, 171, 65.

УДК 662.215.1

О ПЕРЕХОДЕ ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ВВ В ДЕТОНАЦИЮ

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

Переход горения конденсированных систем в детонацию сравнительно мало изучен. В случае газовых систем прогресс в этой области был достигнут благодаря работам прежде всего советских ученых [1—4], которые внесли существенный вклад в понимание данного явления. Проведение экспериментов по изучению перехода горения в детонацию конденсированных систем вследствие разрушающего действия возникающих при этом высоких давлений связано со значительно большими трудностями, чем аналогичные исследования в газах.

Первые опыты, поставленные с целью выяснения механизма возникновения детонации в конденсированных системах, были выполнены в работах [5, 6]. Значительно позже были опубликованы работы, в ко-