

Результаты экспериментов представлены в табл. 3. Значения углов перехода $\alpha_{кр}$ лежат между α_2 и α_1 , где α_2 — нижняя граница углов, при которых канал образуется по всей высоте спрессованного образца, α_1 — верхняя граница углов, при которых спрессованный образец имеет однородную структуру. При углах $\alpha_2 > \alpha > \alpha_1$ канал образуется только в верхней части образца.

Таким образом, экспериментальными исследованиями показано, что при косом столкновении ударных волн в пористом титане реализуются регулярный и нерегулярный режимы отражения. Образцы, спрессованные в регулярном режиме столкновения, имеют однородную по сечению структуру, а в структуре образцов, спрессованных в нерегулярном режиме, имеются зоны расплавов и пустоты. Установлено, что угол перехода регулярного режима столкновения в нерегулярный в пористом титане зависит от интенсивности сталкивающихся ударных волн. Полученные в работе значения углов перехода для титанового порошка существенно меньше, чем у монолитных металлов [5].

Авторы приносят глубокую благодарность Г. И. Новожонову, принимавшему участие в экспериментах по определению параметров ударного сжатия титанового порошка.

*Институт гидродинамики СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
8/1 1976*

Т а б л и ц а 3

P , кбар	α_1 , град	α_2 , град
10	5,5	8
17	7,5	9
24	8,5	14
38	8	12

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Ставер. Канд. дис., ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1971.
2. О. Н. Бреусов. Автореф. докт. дис., ИХФ, Черногловка, 1975.
3. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, **132**, 1339.
4. А. А. Дерibas, А. В. Крупин и др. ФГВ, 1973, **9**, 6, 883.
5. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1961, **41**, 5, 1382.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЖИДКИХ ВВ СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. А. Гончаров, А. В. Дубовик, В. К. Боболев

Механизм инициирования нормальной детонации жидких взрывчатых веществ (ЖВВ) мощными ударными волнами подробно изучен теоретически и экспериментально [1]. Установлено, что взрывную реакцию возбуждают ударные волны с амплитудой ≈ 100 кбар. В работах [2—4] показано, что если жидкость содержит разрывы сплошности — кавитационные пузыри, которые образуются в процессе инициирования, то химическая реакция, распространяющаяся в форме нормальной детонации или детонации с малой скоростью, возникает под действием ударных волн с амплитудой 1—10 кбар.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные, с помощью которых было бы можно ответить на вопрос, каков механизм инициирования ЖВВ при схлопывании кавитационных полостей ударными волнами. Наиболее вероятной представляется гипотеза, основанная на боуденовской концепции горячих точек [5], согласно которой возбуж-

дение взрывной реакции внутри пузыря происходит за счет адиабатического сжатия и разогрева его содержимого — паров, капель ЖВВ, образующихся вследствие неустойчивости процесса схлопывания пузыря и диспергирования микрокумулятивной струи, которая возникает при взаимодействии ударной волны с вогнутой поверхностью пузыря.

Разогрев вещества, определяющий возможность инициирования, зависит как от свойства взрывчатой жидкости — вязкости, плотности ρ_0 , теплоемкости c_p , теплопроводности, упругости насыщенных паров P_v , так и от внешних факторов, влияющих на процесс образования и схлопывания кавитационных полостей. Таким образом, повышение температуры при схлопывании пузыря характеризуется сложной зависимостью $T = f(P_1, \dots, P_n, P_k, P_u)$, вид которой в настоящее время неизвестен. Здесь P_1, \dots, P_n параметры ЖВВ, P_k — характеристика воздействия, вызывающего появление кавитационных пузырей, P_u — характеристика воздействия, приводящего к их схлопыванию. Если скорость химической реакции подчиняется закону Аррениуса, то в конкретных условиях опыта инициирование будет происходить при достижении некоторой критической температуры T_* , зависящей от свойств ВВ. Полагая, что возбуждение взрыва определяется главным образом значениями P_k и P_u можно считать, что для данного вещества условия инициирования характеризуются некой «изотермой» $T_* = f(P_1, \dots, P_n, P_k^*, P_u^*)$. На рис. 1 схематически показан возможный вид указанной кривой, разделяющей плоскость P_k — P_u на область отказов (ниже кривой) и взрывов. Значение P_c соответствует порогу образования кавитации.

В интервале $0 < P_k < P_c$ условия инициирования характеризуют процесс возбуждения нормальной детонации однородных ВВ мощными ударными волнами $P_u \approx 100$ кбар. Область очень больших $P_k \gg P_c$ отвечает условиям возбуждения взрыва ЖВВ в состоянии пара.

На промежуточном участке кривой зависимость $P_u(P_k)$ может быть представлена аналитически при некоторых предположениях относительно свойств жидкого вещества и характера внешнего воздействия. Известно [10], что радиус пузырька, растущего в безграничном объеме

идеальной жидкости, связан с давлением в среде зависимостью $r = t[2(P_k + P_v)3\rho_0]^{1/2}$. Работа, совершаемая внешним давлением P_u при захлопывании пузырька, равна величине $4/3\pi(P_u - P_v)r^3$. Она распределяется между кинетической и внутренней энергией, необратимое изменение которой выражается через приращение температуры как $c_p(T - T_0)$, где T_0 — начальная температура. Отсюда критическая величина разогрева ЖВВ записывается через параметры воздействий P_u и P_k в виде $\Delta T \sim t_p^3 P_u P_k^{5/2}$, где t_p — время роста пузырька. Если последнюю величину выбрать постоянной, то для всех ЖВВ имеем $\Delta T_* \sim P_u P_k^{3/2}$. Поскольку в одинаковых условиях инициирования различные ЖВВ характеризуются соответствующими изотермами $T_* = \text{const}$, на плоскости P_k — P_u располагается семейство кривых, определяющих условия инициирования. Из рис. 1 следует, что при фиксированном значении $P_k^* > P_c$ можно получить набор величин P_u^* , определяющих критические давления инициирования различных ВВ в состоянии кавитации. Этот вывод в настоящей работе положен в основу метода сравнительной оценки чувствительности ЖВВ к слабым ударным волнам.

Сведения по определению чувствительности ЖВВ к воздействию слабых ударных волн носят отрывочный характер. В работе [6] с помощью метода промежутков получены P_u^* для нитроглицерина (1,5 кбар) и нитрогликоля (2,0 кбар). В указанной работе непосредст-

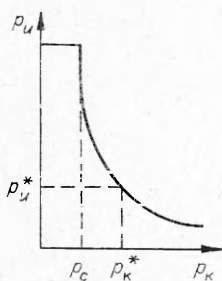


Рис. 1

венное измерение P_u^* , по-видимому, не проводилось, а находилось пересчетом по известным ударным адиабатам ЖВВ и экрана. Кроме того, полученные значения P_u^* невозможно сравнивать между собой, поскольку использовались заряды фиксированного веса и экраны различной толщины, что приводило к неодинаковым значениям воздействий P_h^* , вызывающих кавитацию ЖВВ.

В настоящей работе условия возникновения кавитации были одинаковы для всех исследуемых ЖВВ. Для этого использовались заряды постоянного веса и экраны фиксированной толщины. Схема опыта показана на рис. 2. Цифрами обозначены: 1, 10 — стандартные искровые капсулы-детонаторы; 2 — детонирующий шнур; 3 — активный заряд ВВ (масса 2 г, плотность 1,2 г/см³); 4 — стальная муфта (высота 25, диаметр 10 и толщина стенок 25 мм) с цилиндрической полостью (диаметр 10 и глубина 60 мм); 5 — носик муфты (диаметр 12, высота 5 мм), который погружен на 3 мм в исследуемое ЖВВ; 6 — стеклянный цилиндр (диаметр 13, высота 30, толщина стенок 1,5 мм); 7 — исследуемое ЖВВ в количестве 4 мл; 8 — алюминиевая экранирующая пластина 100 × 100 мм² и толщиной 5 мм; 9 — плексигласовый стержень — ослабитель диаметром 20 и высотой $l=30$ мм. В экспериментах с различными веществами все перечисленные параметры оставались неизменными, варьировался только состав навески активного заряда ВВ с целью определения критических условий инициирования взрыва.

Ударная волна D_1 , созданная взрывом капсулы-детонатора 10, после прохождения ослабителя и экранирующей пластины вызывала кавитацию в ЖВВ. В момент, когда кавитационная зона достигала верхнего края цилиндра, из носика муфты начинала распространяться ударная волна D_2 , схлопывающая кавитационные пузыри и возбуждающая химическую реакцию, если ее амплитуда превышала критическую. Синхронизация по времени осуществлялась с помощью детонирующего шнура определенной длины. Фоторегистрация проводилась камерой СФР, щель которой располагалась параллельно оси заряда. Яркость свечения возникающей реакции регистрировалась фотоумножителем, в его поле видимости находился участок ЖВВ вблизи носика муфты.

Давление во фронте инициирующих ударных волн измерялось датчиками на основе пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 10 мм и толщиной 1 мм, которые наклеивались на носик муфты. Датчики градуировались по давлениям ударных волн в глицерине, скорость которых измерялась на базе длиной 2 мм. В области давлений более 5 кбар зависимость электрического заряда от амплитуды ударной волны нелинейная, что связано с динамическим пределом текучести пьезокерамики [7]. Погрешность измерения давления, возрастающая с увеличением амплитуды ударной волны, определялась ошибками в установлении времени прохождения базы при градуировке.

На рис. 3, а показана типичная фотограмма процессов кавитации возникновения детонации с малой скоростью в нитроглицерине. На рис. 3, б приведены соответствующие осциллограммы давления и яркости свечения взрыва. В момент времени t_1 ударная волна, распространяющаяся по стеклянной оболочке со скоростью 5,2 км/с, достигает носика муфты. Начиная с этого момента датчик давления регистрирует чередующиеся волны сжатия и разрежения.

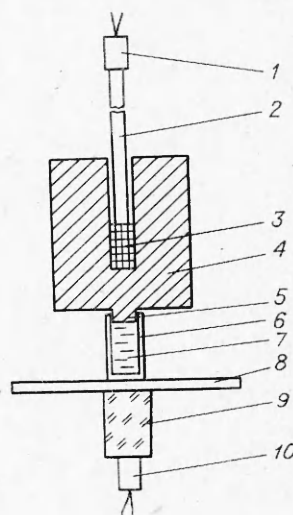


Рис. 2

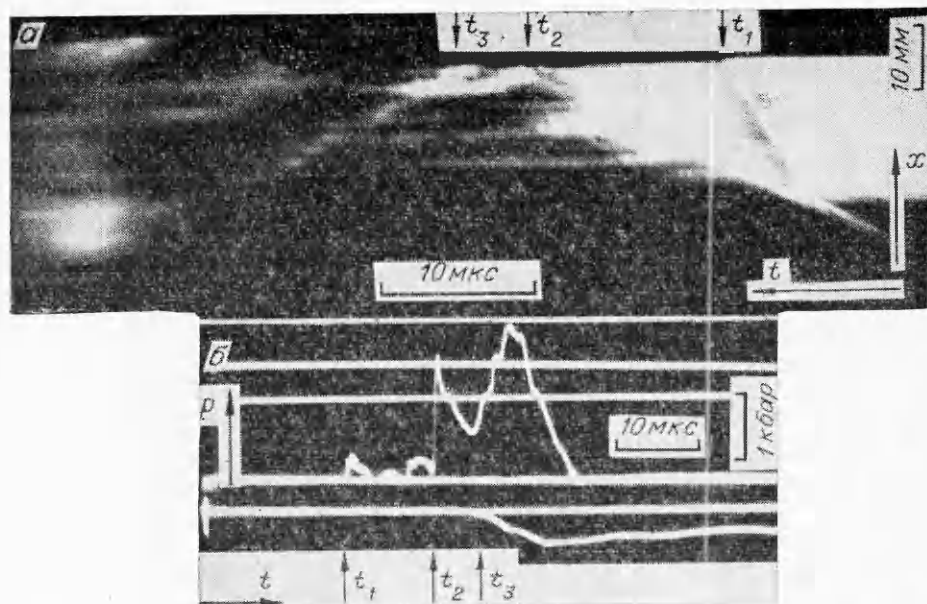


Рис. 3

Кавитация возникает главным образом за фронтом ударной волны в ЖВВ ($D_1=1,7$ км/с, $P \approx 0,3$ кбар), которая взаимодействует с носиком муфты в момент t_2 . В специальных опытах по сохранению цилиндров с инертной жидкостью было установлено, что полная потеря прозрачности исследуемых зарядов за фронтом D_1 связана с кавитацией, а не с разрушением стеклянной оболочки заряда. В момент t_2 в нитроглицерин входит ударная волна D_2 , инициирующая детонацию с малой скоростью ($D=1,8$ км/с). Свечение продуктов взрыва и соответствующий подъем давления регистрируются в момент t_3 .

Представленные на рис. 3 фотографии демонстрируют типичную картину развития взрыва в НГЦ. В других исследуемых веществах взрывчатое превращение распространялось как в виде детонации с малой скоростью (м), так и в виде нормальной детонации (н) (табл. 1). В последнем столбце таблицы указаны преимущественные формы распространения взрыва.

Другая особенность указанной картины — инициирование реакции при отражении волны D_2 от носика муфты после одной или многократ-

Таблица 1

Вещество	Условия инициирования при вероятности (%)		P_{*}^* , кбар при вероятности (%)		Характеристика процесса
	100	0	100	0	
ТНМ—бензол 90/10	СТ 20/80	СТ 50/50	$1,1 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,2$	н
Нитроглицерин	СТ 20/80	СТ 50/50	$2,0 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,2$	м
Динитратбисметилолфуроксана	ТГ 85/15	Т	$3,2 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,2$	м, н
ТНМ—бензол 93/7	ТГ 30/70	ТГ 50/50	$3,3 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,2$	н
ТНМ—НМ 67/33	Г	ТГ 50/50	$4,1 \pm 0,4$	$3,0 \pm 0,2$	м
Диэтиленгликольдинитрат	Г $\rho=1,7$ г/см ³	Г	12 ± 1	5 ± 1	м

ной циркуляции по заряду ЖВВ (соответствующий период задержки взрыва составлял kh/D_2 , где h — длина цилиндра и k — число циркуляций волны D_2). Такое явление часто наблюдалось вблизи критических условий инициирования и создавало трудность определения действительной величины критической амплитуды ударной волны. В самом деле, возмущения в жидкости, вносимые многократной циркуляцией ударной волны D_2 , эквивалентны увеличению значения P_u , и измеренные в этом случае величины P_u^* невозможно сравнивать для разных ЖВВ. Поэтому для всех ЖВВ значения критических давлений инициирования определялись в случае, если взрыв возникал на первой циркуляции ударной волны D_2 .

Результаты испытаний ЖВВ при использовании цилиндров с $l = 30$ мм приведены в табл. 1. В графе «Условия инициирования» перечислены взрывчатые вещества, находившиеся в полости муфты, когда инициирование происходило с вероятностью 100 и 0% (СТ — смесь тротила с хлористым натрием, Т — тротил, Г — гексоген). В следующей графе приведены соответствующие давления во фронте ударных волн. Каждое значение получено усреднением результатов 5 опытов. Помимо перечисленных в таблице ЖВВ, в работе исследовались нитрометан (НМ) и тетранитрометан (ТНМ). В условиях неразрушающейся муфты эти вещества инициировать не удалось.

Из табл. 1 следует, что давления инициирования нитроглицерина совпадают с полученными в работе [6]. Это совпадение носит случайный характер и обусловлено конкретным выбором толщины ослабителя. Оказалось также, что порядок величины критических давлений инициирования ЖВВ в состоянии кавитации такой же, как и для твердых ВВ насыпной плотности. Например, при $\rho = 1,0$ г/см³ $P_u^* = 2,5$ кбар для тэна и 5,5 кбар для тротила [8, 9]. Еще большая аналогия в чувствительности кавитирующих ЖВВ и твердых порошкообразных ВВ выясняется при анализе данных табл. 2, которые свидетельствуют об уменьшении критического давления инициирования P_u^* с уменьшением толщины ослабителя (прочерки означают, что ЖВВ взрывается в волне D_1). В рассматриваемых условиях опытов с толщиной ослабителя однозначно связана степень кавитации (иными словами «пористость») ЖВВ. Известно [9], что величина критического давления инициирования ВВ возрастает с плотностью заряда.

На основании данных табл. 1 исследованные ЖВВ можно расположить в ряд по степени возрастания чувствительности к воздействию слабых ударных волн и условно разделить их на три группы. В первую группу следует включить ЖВВ, перечисленные в табл. 1, за исключением диэтиленгликольдинитрата. Их ударная чувствительность характеризуется величинами критических давлений инициирования $P_u^* = 1 \div 5$ кбар. Вторую группу составляют ЖВВ, обладающие промежуточной чувствительностью. Значения критических давлений инициирования $P_u^* = 5 \div 20$ кбар. В третьей группе находятся малочувствительные вещества ТНМ и НМ. В состоянии кавитации они взрываются под действием ударных волн с амплитудой $30 \div 50$ кбар [3].

Таблица 2

Вещество	P_u^* , кбар (100%)	l , мм
Нитроглицерин	—	20
	2,0	30
	6,0	40
ТНМ—НМ 67/33	—	5
	3,0	20
	4,1	30
	10,0	40

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
2. С. Н. Winning. Explosivstoffe, 1963, 11, 2, 34.
3. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. ФГВ, 1969, 5, 3, 354.
4. Е. В. Гордеев, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 172, 2, 383.
5. Ф. Ф. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких взрывчатых веществах. М., ИЛ, 1955.
6. R. W. Watson. 12-th Symposium (International) on Combustion, 1968; The Combustion Onst., Pittsburgh, Pen., p. 723.
7. Е. З. Новицкий, Е. С. Тюнькин и др.— В кн.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. G. E. Seay, L. B. Seely. J. Appl. Phys., 1961, 32, 6, 1092.
9. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов и др.— В сб.: Взрывное дело, № 68/25. М., «Недра», 1970.
10. А. Д. Перник. Проблемы кавитации. Л., «Судостроение», 1966.

ПЕРЕХОД ОТ МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ К РЕГУЛЯРНОМУ И ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ

Л. Г. Гвоздева, В. П. Фокеев

Нерегулярное отражение — распространенный тип отражения ударных волн. В газодинамике взрыва действие взрывной волны на поверхность зависит от различных форм маховского и регулярного отражения. Отражение ударных волн определяет структуру потока за ударными волнами при их движении в трубе и в каналах переменного сечения. Интерес к различным формам маховских конфигураций проявляется также в последнее время в связи с исследованием структуры спиновой детонации, во фронте которой наблюдают сходные конфигурации ударных фронтов [1].

К настоящему времени как экспериментально, так и в результате расчетов численными методами исследованы формы простой и двойной маховской конфигурации [2—12], предложены критерии возникновения двойной конфигурации Маха и промежуточных форм, которые проверены при отражении на угле клина 24° [3, 4, 6].

Появились также работы, связывающие существование двойной конфигурации Маха с переходом от маховского отражения к регулярному [13—15]. Настоящая работа предпринята с целью обобщения данных, полученных в предыдущих работах, и построения более полной картины перехода одних форм маховского отражения в другие, вплоть до перехода к регулярному отражению. С этой целью исследования проводились в более широком диапазоне исследуемых углов, чем это было сделано ранее. В ударную трубу квадратного сечения 72×72 мм² вводились плоские клинья, величину угла при вершине которых можно было плавно менять. Для каждого угла опыты проводились с числами Маха падающих волн M_0 , меняющимися от 2 до 8. Углы в далеких от критического значения областях менялись через 8° , вблизи — через 2° .

Исследовались воздух, азот, углекислый газ, аргон при начальных давлениях от 2 до 100 мм рт. ст. Получались тепловоскопические фотографии квазистационарного процесса отражения, сфотографированные со временем экспозиции, меньшим 1 мкс. Для регистрации давления на поверхности применялись миниатюрные пьезодатчики на основе керамики ЦТС с диаметром воспринимающей поверхности 1,5 мм. Чувствитель-