

время появления отраженной волны в данной конструкции камеры составляет 3—5 мс. По-видимому, это явление связано со сложным колебательным процессом всей конструкции и, в частности, с тем, что собственные частоты радиальных и продольных колебаний корпуса близки.

Возможное появление «раскачки» и образование колебаний высоких гармоник следует иметь в виду при разработке проектов камер, так как неожиданные деформации могут привести к разрушению корпуса.

В заключение автор выражает благодарность В. И. Якушеву и Н. Т. Гомаюну за помощь в проведении эксперимента.

Новосибирский
государственный университет

Поступила в редакцию
10/III 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ПМТФ, 1968, 6, 94.
2. А. Е. Войтенко, А. Ф. Демчук, Б. И. Куликов. ПТЭ, 1970, 1, 250.
3. А. Ф. Демчук. ПМТФ, 1968, 5, 47.
4. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
5. M. C. de Malherbe, R. D. Wing a. o. J. Mech. Eng. Sci., 1966, 8, 1, 91.
6. Б. Я. Светлов, Н. Е. Яременко. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М., «Недра», 1966.
7. М. А. Цикулин. ПМТФ, 1960, 3, 188.
8. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., Гостехиздат, 1955.
9. Н. Н. Давиденков. Динамические испытания металлов. Л., ОНТИ, 1936.
10. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1961, 6, 175.
11. Р. Х. Курбангалина.— В сб.: Физика взрыва, № 2, М., Изд-во АН СССР, 1953.

ОБ ОДНОЙ ОСОБЕННОСТИ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

О. Е. Попов, С. М. Когарко

Образование затухающей последовательности волн давления в жидкости при подводном взрыве и дальнейших пульсациях газового пузыря — хорошо известное явление. В случае взрыва конденсированного ВВ амплитуда волны первой пульсации составляет 10—20% от амплитуды ударной волны, а процесс радиальных колебаний удается описать с помощью метода Кирквуда — Бете [1] и квазиакустического метода [2], получая удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. В [3] расчеты этими методами сделаны в предположении изэнтропичности процесса пульсаций. При этом затухание пульсаций в основном определяется энергией, уносимой волной давления, которая составляет около 50% энергии, выделившейся при взрыве ВВ.

Так как для подводного взрыва взрывчатой газовой смеси (ВГС) энергия волны составляет не более 1—2% выделившейся энергии, то применение обоих методов для расчета пульсаций пузыря продуктов детонации ВГС дает последовательность монотонно и слабо убывающих пиков давления на кривой давление — время [3]. Однако этот результат не соответствует экспериментально наблюдаемым зависимостям давления от времени в волнах, которые обладают характерной особенностью, заключающейся в том, что амплитуда волны при первой пуль-

сации оказывается выше, чем амплитуда основной волны (рис. 1).

Цель данной работы — выяснение физических причин такого эффекта «аномальной» пульсации.

Аномальность понимается в том смысле, что эффект не объясняется в рамках модели течения, предполагающей изэнтропичность процесса пульсаций. Если сравнить наблюдаемые и расчетные зависимости давление — время в волнах (рис. 1, б), то оказывается, что найденные экспериментально величины периодов пульсаций ниже вычисленных. Это указывает на существование потерь энергии из полости, заметно больших, чем акустическое излучение. Причиной потерь, по-видимому, является теплопередача из пузыря к окружающей жидкости, чему способствует высокая температура в продуктах (~ 3600 К в начальный момент для смеси $C_3H_8+5O_2$).

Найдем величины энергии, переходящей к жидкости и остающейся в продуктах реакции при подводном взрыве газовой смеси, и покажем, что эффект «аномальной» пульсации можно объяснить теплотерями из газовой полости.

Уравнение движения и закон сохранения энергии при пульсации. Если пренебречь малой величиной энергии, уносимой волной давления, то радиальное движение жидкости при подводном взрыве газовой смеси может быть описано уравнением Рэлея

$$R \cdot d^2R/dt^2 + 3/2(dR/dt)^2 = (p(R) - p_0)/\rho_0, \quad (1)$$

где $R(t)$ — радиус газового пузыря в зависимости от времени; $p(R)$ — давление в пузыре; p_0, ρ_0 — давление и плотность жидкости. Интегрирование по R этого уравнения дает соотношение, выражающее закон сохранения энергии

$$\rho_0(V - V_0) + 2\pi\rho_0R^3(dR/dt)^2 = \int_{V_0}^V p(V) dV. \quad (2)$$

Левая часть равенства представляет потенциальную и кинетическую энергии жидкости к моменту расширения продуктов до объема V , а правая — работу расширения продуктов, которая равна изменению внутренней энергии содержимого пузыря, но при условии адиабатичности пульсаций. В этом случае можно найти предельно возможную степень расширения пузыря (отношение максимального радиуса R_m к начальному R_0) из уравнения

$$(R_m/R_0)^3 - 1 = p_v/p_0(k_1 - 1) [1 - (R_m/R_0)^{3(1-k)}], \quad (3)$$

где для смеси $C_3H_8+5O_2$ примем [4] $k \approx k_1 = 1,24$, $p_v = p_{ж}/2$, $p_v/p_0 = 17$ (p_v — давление взрыва, $p_{ж}$ — давление в точке Жуге, k — показатель политропы продуктов реакции).

В табл. 1 сравнены значения R_m/R_0 , вычисленные по соотношению (3) и найденные экспериментально. Здесь же указана начальная температура t_1 в пузыре, рассчитанная методом [5] с учетом диссоциации, и температура t_2 , соответствующая адиабатическому расширению до радиуса R_m . На основе такого сравнения можно сделать вывод, что

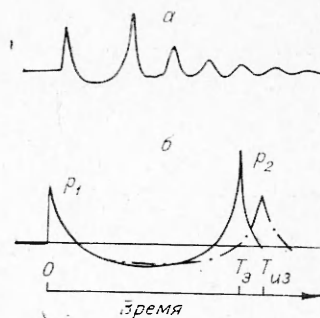


Рис. 1. Типичная осциллограмма давления в волне при подводном взрыве газовой смеси $C_3H_8+5O_2$ объемом $4,6 \cdot 10^{-3}$ м³, глубина взрыва 10 м, расстояние до точки измерения 1 м (а); сравнение наблюдаемой зависимости давление — время с расчетом в изэнтропическом приближении (штрихпунктир) $P_1 = 3,4$ бар, $P_2 = 4,5$ бар, $T_{из} = 53$ мс, $T_{э} = 41 \pm 2$ мс (б).

Таблица 1

Объем ВГС, л	Степень расширения		Температура, К	
	$(R_m/R_0)_p$	$(R_m/R_0)_э$	t_1	t_2
0,1		3,3±0,1		
4,6	3,52	3,5±0,1	3580	1400

теплопотери уменьшают степень расширения пузыря, но только для взрывов малых объемов ВГС.

Используя измеренные значения R_m/R_0 , найдем долю начальной внутренней энергии продуктов, переходящую в потенциальную энергию воды

$$x < E_n/E \leq 0,6,$$

где $E_n = p_0(V_m - V_0)$, $E = p_n V_0 / (k_1 - 1)$. Верхняя граница значений достигается для взрывов, где теплопотери в процессе расширения невелики (объемы смеси $> 4,6$ л), а величина x зависит от взрываемого объема. При $V_0 = 100$ см³ $x \approx 0,5$.

Энергия, остающаяся в продуктах при максимальном расширении $E_{ост} = p V_m / (k - 1)$, в отсутствие заметных теплопотерь может достигать величины $\sim 0,4 E$ (энергией, уносимой волной, пренебрегаем), а при политропическом процессе с $k > k_1$

$$E_{ост}/E = (V_m/V_0)^{1-k} < 0,4.$$

Проанализируем процесс сжатия пузыря, происходящий за счет потенциальной энергии жидкости. При полном отсутствии потерь энергии жидкость сжимает пузырь до первоначального объема с повышением давления в нем до p_n . В рамках адиабатического приближения объяснить эффект «аномальной» пульсации не удастся, но эффект может быть объяснен, если допустить существование в фазе сжатия потерь тепла из пузыря.

Проведем мысленный эксперимент. Пусть пузырь адиабатически расширился до максимального размера, передав около 60% энергии жидкости, а затем мгновенно потерял всю оставшуюся внутреннюю энергию. Этот мысленный эксперимент соответствует классической задаче Рэлея о захлопывании пустой полости. Эффект захлопывания — один из примеров неограниченной кумуляции [6], при которой происходит концентрация энергии в малой области пространства с достижением чрезвычайно высоких давлений.

Так как реально имеется лишь частичная потеря тепла продуктами, то величина давления при сжатии полости оказывается конечной. Она должна зависеть от объема, до которого сжался пузырь (этот объем будет меньше объема, который занимали продукты в начальный момент), и от скорости движения жидкости. Можно ожидать, что чем меньше взрываемый объем, тем сильнее проявляются потери тепла и особенно когда радиус пузыря близок к минимальному. Теплопотерям также способствует фактор неустойчивости границы раздела при сжатии пузыря [7].

Доказать справедливость предложенного объяснения и обнаружить ожидаемое пересжатие пузыря можно с помощью фоторегистрации пульсаций с одновременным измерением давления. При этом целесообразно провести эксперименты со сравнительно малыми объемами газовых смесей, для которых теплопотери и пересжатие пузыря должны проявляться заметнее. Также следует попытаться искусственным способом увеличить теплопотери из полости. Усиление эффекта «аномальности» может служить прямым экспериментальным доказательством роли теплопотерь.

Экспериментальное доказательство роли теплопотерь. Взрывы малых объемов газовых смесей проведены в лабораторном бассейне с размерами 1000×1200×1500 мм, оборудованном для теневой фоторазверт-

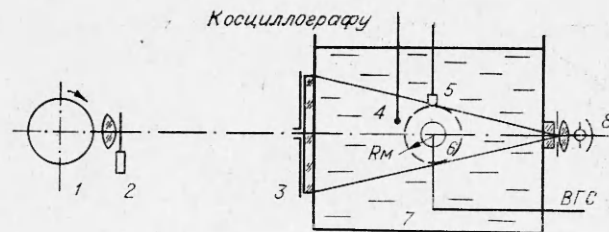


Рис. 2. Схема установки.

1 — фоторегистратор; 2 — затвор; 3 — окно со щелью; 4 — датчик давления; 5 — распылитель; 6 — взрываемый объем; 7 — бассейн с водой; 8 — осветительная система.

ки процесса пульсаций и одновременного измерения волн давления. Схема установки показана на рис. 2.

Взрывы инициировались пережиганием проволочки в центре стеклянных сферических оболочек объемом 60 и 100 см³, заполненных взрывчатой газовой смесью (стехиометрические составы пропана с кислородом и водорода с кислородом). В ряде опытов смеси разбавлялись инертными газами — Не и Аг, изменяющими величину коэффициента температуропроводности содержимого пузыря.

Фоторазвертки показали, что при наличии эффекта аномальности, о котором судили по характеру волны давления, всегда наблюдается сжатие пузыря до меньшего размера, чем начальный. Такое пересжатие, как следует из табл. 2, оказывается тем больше, чем выше относительная амплитуда второй волны P_2/P_1 . Пример фоторазвертки процесса пульсации показан на рис. 3, где пересжатие заметно наиболее четко. Исследуемая смесь, продуктами реакции которой являются пары воды, позволяет провести опыт, на наш взгляд, наиболее убедительно демонстрирующий роль теплопотерь из пузыря в рассматриваемом эффекте. Суть его сводится к следующему. Если в момент достижения пузырем максимального размера искусственно охладить продукты, например, вбросив в них мелкодисперсный распыл капелек воды, то это вызывает конденсацию пара и резкое падение давления в пузыре. Последующее захлопывание полости концентрирует энергию и ведет к образованию интенсивной волны в жидкости.

Поскольку предварительно было установлено, что радиус пузыря объемом 60 см³ со смесью $2H_2+O_2$ при взрыве увеличивается в 2,2 раза, достигая величины 5,3 см, то распылитель 5 (см. рис. 2), с помощью которого в пузырь вбрасывалось 5 см³ воды, размещался над оболочкой на расстоянии, чуть меньшем 5,3 см. Распылитель (перфорированная емкость) приводился в действие малой детонационной трубкой, заполненной той же смесью. Задержка срабатывания распылителя относительно момента зажигания в сферическом объеме устанавливалась равной половине периода пульсации.

Миниатюрный цилиндрический пьезодатчик диаметром 2 мм располагался на расстоянии 5,5 см от центра заряда. Такое положение диктовалось, с одной стороны, стремлением приблизить точку измерения к самому заряду, чтобы увеличить отношение сигнал/шум, если называть шумом результат действия отраженных от стенок бассейна волн. С другой стороны, датчик не должен подвергаться нагреву продуктами взрыва, т. е. во всех случаях измерений находиться в воде и

Таблица 2

Состав ВГС	R_m/R_0	P_2/P_1
$C_3H_8+5O_2$	0,8	1,2—1,3
$2H_2+O_2$	0,15—0,3	2—4
$2H_2+O_2+2He$	0,8	1,3
$2H_2+O_2+2Ag$	1,0	0,96



Рис. 3. Теневая фоторегистрограмма пульсаций пузыря при взрыве смеси $2\text{H}_2+\text{O}_2$; $R_0=2,4$ см, $R_m=5,3$ см, $T_3=11$ мс.

не попадать в пузырь. При высоте бассейна 1 м расположение заряда на половине высоты и указанном расстоянии датчика от центра заряда обеспечивает отношение сигнал/шум примерно 10.

Результаты эксперимента иллюстрируются осциллограммой давления (рис. 4). Эффект увеличивается настолько, что оказывается затруднительно в одном масштабе измерить первый и второй пики давления (второй пик оказывается зашкаленным). Поскольку регистрирующая система датчик — катодный повторитель — осциллограф ОК-24 имеет



Рис. 4. Осциллограмма давления при вбрасывании в пузырь распыла воды. Длительность развертки 30 мс; $P_1=4,4$ бар.

частотную полосу до 200 кГц, авторы не стремились измерить достигаемое при захлопывании пузыря давление, а ограничились сравнением шумового сигнала, обусловленного многократным отражением волн от стенок бассейна и поверхности жидкости для первой и второй волны.

В заключение следует указать, что эффект «аномальной» пульсации уменьшается при увеличении взрывае-

мого объема. Эксперименты, проведенные авторами в морских условиях, показали, что эффект для сферических взрывов смеси $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ существует, пока величина взрываемого объема остается меньше 10 л.

Описанный эффект никогда не наблюдается при расширении сжатого холодного газа в жидкости («физический взрыв» [8]), для которого хорошо выполняется условие адиабатичности пульсаций. Он не наблюдается и при подводном взрыве ВВ [1—3], где теплотери малы по сравнению с энергией, уносимой ударной волной.

Результаты исследования позволяют заключить, что эффект «аномальной» пульсации, наблюдающийся при подводном взрыве газовых смесей, связан с теплопотерями из пузыря, приводящими к сжатию пузыря до размера меньшего, чем начальный.

Институт химической
физики АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
26/IV 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
2. J. V. Keller, J. J. Kolodner. J. Appl. Phys., 1956, 27, 10.
3. В. М. Любошиц, В. Е. Первушин. Механика жидкости и газа, 1971, 2.
4. С. М. Когарко, В. В. Адушкин, А. Г. Лямин. ФГВ, 1965, 1, 2.
5. А. М. Гурвич, Ю. Х. Шаулов. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения. М., изд-во МГУ, 1965.
6. Е. И. Забабахин.— В сб.: Механика в СССР за 50 лет. Т. 2. М., «Наука», 1970.
7. M. S. Plesset. J. Appl. Phys., 1954, 25, 1.
8. L. Neuckroth, I. I. Glass. Phys. Fluids, 1968, 11, 10.