

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. Г. Абрахамсон. Тр. мер. об-ва инж.-мех. Сер. Е. Прикладная механика, т. 28, № 4, 1961.
3. A. Bahrani, T. Black, B. Crossland. Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1967, 296, 1445.
4. J. H. Hunt. Phil. Mag., 1968, 17, 148.
5. S. K. Godunov, A. A. Deribas a.o. J. Comp. Phys., 1970, 5, 3.
6. S. R. Reid, N. H. S. Sherif. Prediction of the wavelength of interface waves in symmetric explosive welding. High-Energy Rate Metalworking by Using of Explosive Materials. Conference, Warsaw, 1975.
7. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов и др. ФГВ, 1968, 4, 1.
8. А. А. Дерибас, И. Д. Захаренко. ФГВ, 1974, 10, 3.
9. С. К. Годунов, А. А. Дерибас, В. И. Мали. ФГВ, 1975, 11, 1.
10. J. Walsh, R. Shreffler, F. Willing. J. Appl. Phys., 1953, 24, 3.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СТЕНОК ВЗРЫВНЫХ КАМЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКИ

А. А. Бузуков

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и совершенствованию конструкций взрывных камер как одного из видов научного и производственного оборудования [1—4]. Взрывные камеры незаменимы при проведении мелкомасштабных взрывных работ в лабораторных условиях и применяются на промышленных предприятиях, где в технологических операциях используется энергия взрыва.

Широкое практическое использование взрывных камер сопряжено с решением проблемы прочности корпуса. Свойства материала стенок камер и особенности их конструктивного выполнения ограничивают вес заряда ВВ, который допустимо взрывать. Поэтому разработке методик расчета корпусов взрывных камер на прочность уделяется значительное внимание [1, 3, 5].

В настоящей работе приводятся данные экспериментального изучения деформаций стенок цилиндрической, наполненной воздухом, взрывной камеры и проводится сравнение их с расчетными. Приводятся также результаты измерения деформаций «раскачки», которая до настоящего времени не учитывалась при расчетах корпусов камер.

Экспериментальный стенд. Боковые стенки замкнутой емкости цилиндрической формы представляют собой отрезок стальной трубы диаметром 810, длиной 2500 мм и толщиной 10 мм. Торцевые верхняя (съёмная) и нижняя крышки камеры изготовлены из стальной плиты толщиной 40 мм и с помощью болтов крепятся к фланцам, приваренным к корпусу и подкрепленным косынками.

Во всех опытах в качестве заряда ВВ использовались нити промышленного детонирующего шнура ДШ-В, имеющего паспортный вес тэна 12 г/м [6]. Несколько отрезков ДШ-В длиной 2 м соединялись в связку и подвешивались на кронштейнах внутри камеры так, чтобы связка располагалась по ее оси. Один конец связки вводился в толсто-стенную капсулу, где к заряду подсоединялся электродетонатор. Капсула предохраняла стенки камеры от поражения осколками корпуса капсула-детонатора.

Измерение деформаций стенок взрывной камеры проводилось с помощью тензометрического комплекса. Тензодатчики проволочного типа наклеивались в шести точках цилиндрической части корпуса камеры

Определяемые величины	Количество нитей ДШ-В					
	1	2	3	4	5	6
ΔP , кг/см ²	2,04	3,45	4,80	6,12	7,40	8,67
I_+ , кгс/м ²	3,05	5,44	7,05	8,75	10,35	11,90
τ_+ , мс	0,61	0,71	0,79	0,86	0,92	1,00
$\Delta P_{отр}$, кг/см ²	6,8	13,8	21,4	29,4	37,6	41,6
a_1 , мм	0,08	0,17	0,28	0,38	0,50	0,62

вдоль одной образующей и ориентировались так, чтобы регистрировать только радиальные деформации. Расстояние между точками измерения составляло 300 мм.

Тензодатчики включались в мостиковую схему усилителя 8АНЧ-7М, откуда сигналы поступали на 9-шлейфовый осциллограф 9SO-1F2. Частота основного тона колебаний корпуса камеры составляет около 2 кГц, поэтому для регистрации деформаций были выбраны гальванометры, имеющие собственные частоты от 4,5 до 10 кГц. Поскольку усилитель имеет падающую характеристику, для каждого канала усиления была снята частотная характеристика. Зависимости, полученные при статической тарировке датчиков деформаций, исправлялись в соответствии с искажениями частотной характеристики. Результирующая погрешность измерения не превышала 25%. С целью уменьшения случайных ошибок и получения осредненных данных каждая серия опытов повторялась 4—6 раз.

Временная привязка сигналов осуществлялась подачей на один из гальванометров меток времени 50 и 500 Гц от специального генератора. Разрешение по времени оказалось не хуже 10^{-4} с.

Задачу о расчете осесимметричных деформаций стенок взрывных камер целесообразно разделить на две части. Сначала определяется величина нагрузок, действующих при взрыве на стенки камеры, в предположении, что стенки абсолютно жесткие. Затем рассматривается перемещение элементов конструкций под действием рассчитанных нагрузок. Применение такого принципа оправдано тем, что смещение стенок мало и практически не изменяет газодинамических характеристик течения в пристеночной области.

Для расчета перепада давления Δp на фронте ударной волны, ее импульса I_+ и времени действия положительной фазы давления τ_+ воспользуемся данными работы [7]:

$$\Delta p = 10,2q/r^2 + 2,0q^{3/8}/r^{3/4}; \quad (1)$$

$$I_+ = 39,7q^{3/4}/r^{1/2}; \quad (2)$$

$$\tau_+ = 0,88r + 1,91q^{1/2}. \quad (3)$$

В формулах (1) — (3) расстояние r выражается в метрах, а погонный вес заряда ВВ q в кг/м в пересчете на тротиловый эквивалент. Следует заметить, что соотношение (3) экстраполировано в соответствии с приведенными в [7] экспериментальными данными к диапазону относительных расстояний, имевших место при выполнении настоящей работы.

В таблице (строки 1—3) приведены рассчитанные по формулам (1) — (3) параметры воздушной ударной волны, образующейся при взрыве цилиндрического заряда. Во всех случаях радиус r принят равным радиусу цилиндрической части корпуса камеры R и составляет 0,4 м.

При отражении ударной волны от стенки камеры происходит увеличение давления в отраженной волне. Для нормального падения ударной волны на жесткую стенку коэффициент увеличения давления в пристеночной области k_p , равный $\Delta p_{отр}/\Delta p$, может быть определен по формуле [8]

$$k_p = 8 - 42/(\Delta p + 7). \quad (4)$$

При воздушном взрыве шнурового заряда ВВ появляется вторичная волна сжатия [7]. Однако давление на фронте вторичной волны сжатия и ее импульс составляют не более 10% от давления и импульса головной волны и поэтому не меняют существенным образом характер нагрузки на стенку камеры.

Уравнение движения стенок взрывной камеры в цилиндрически симметричном случае имеет вид

$$\ddot{a} + a\omega^2 = Ap(t), \quad (5)$$

где $\omega^2 = E/R^2\rho$; $A = 1/\rho\delta$; $E = 2,1 \cdot 10^{10}$ кг/м² — модуль упругости материала стенок камеры; $R = 0,4$ м — радиус цилиндрической части корпуса камеры; $\rho = 0,79 \cdot 10$ кгс²/м⁴ — плотность материала стенок камеры; $\delta = 0,01$ м — толщина стенки камеры; a — радиальное перемещение стенки камеры.

Для решения уравнения (5) необходимо в явном виде задать характер изменения нагрузки на стенку камеры $p(t)$. Для получения результатов расчета по верхнему пределу зависимость нагрузки от времени можно представить в виде линейной функции [5]:

$$p(t) = \Delta p_{отр} (1 - t/\tau_+) \quad \text{для } \tau_+ \geq t \geq 0; \quad (6)$$

$$p(t) = 0 \quad \text{для } t \geq \tau_+.$$

Решение уравнения (5) с правой частью, описываемой (6), выглядит следующим образом:

$$a = A\Delta p_{отр}/\omega^2 \cdot [(\sin \omega t)/\omega\tau_+ - \cos \omega t + (1 - t/\tau_+)]. \quad (7)$$

Максимальное смещение стенок камеры можно определить, подсчитывая момент остановки стенки из соотношения

$$da/dt|_1 = A\Delta p_{отр}/\omega^2 \cdot [(\cos \omega t_1)/\tau_+ + \omega \sin \omega t_1 - 1/\tau_+] = 0. \quad (8)$$

Отсюда

$$a_1 = \frac{A\Delta p_{отр}}{\omega^2} \left[2 - \frac{1}{\tau_+ \omega} \arccos \left(\frac{1 - \tau_+^2 \omega^2}{1 + \tau_+^2 \omega^2} \right) \right]. \quad (9)$$

Подставляя в (9) действующие значения $\Delta p_{отр}$, τ_+ , ω и A , можно рассчитать максимальные радиальные смещения стенок камеры. Данные расчета приведены в последней строке таблицы.

Поскольку толщина стенки цилиндрической части корпуса камеры много меньше радиуса кривизны ее поверхности, то можно считать, что деформация заключается исключительно в одномерном растяжении материала без изменения напряжений по толщине стенки. Напряжение определяется по формуле

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (10)$$

где относительная деформация ε равна в случае цилиндрической симметрии a/R . Подставляя в (10) значение предельной нагрузки $\sigma_{пр} = 22 \cdot 10^6$ кг/м² (предел упругости материала боковых стенок камеры при статическом нагружении), получим, $\varepsilon_{пр} = 0,105\%$ и соответственно $a_{пр} = 0,417$ мм. Отсюда следует, что взрыв связки из пяти нитей ДШ-В нагружает стенки камеры до предела упругости. Следует заметить, что при динамических нагрузках наблюдается существенное

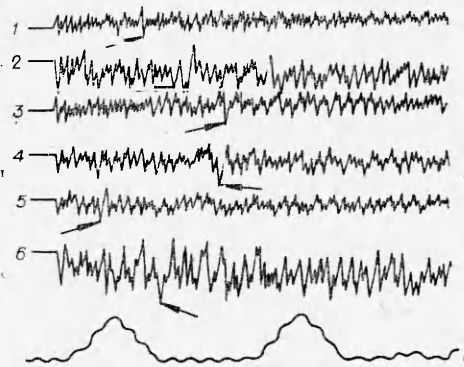


Рис. 1. Осциллограммы записи радикальных перемещений стенок камеры в различных сечениях при взрыве четырех нитей ДШ-В. Метки времени 50 и 500 Гц. Стрелками указаны моменты возбуждения деформации «раскачки».

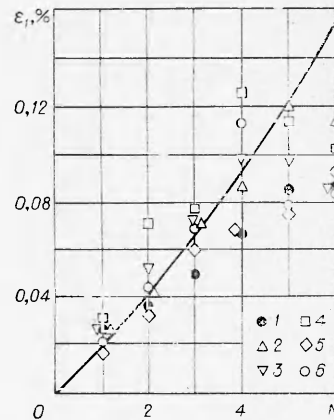


Рис. 2. Значения максимальной относительной деформации при первой пульсации ϵ_1 в различных сечениях корпуса взрывной камеры в зависимости от N нитей ДШ-В в связке.

повышение сопротивляемости материалов [9], поэтому приведенная выше оценка определяет лишь низший допустимый предел деформации.

Взрывные камеры цилиндрической формы испытывают не только радиальные деформации, но и подвергаются продольному растяжению. В качестве упругого элемента в данном случае целесообразно принять боковую цилиндрическую стенку камеры, коэффициент жесткости которой на продольное растяжение определяется зависимостью

$$k_l = 2\pi ER\delta/L, \quad (11)$$

где L — длина боковой стенки камеры, равная в рассматриваемых условиях 2,5 м.

Оценка показывает, что продольная относительная деформация боковых стенок камеры ϵ_l не превышает для связки из шести нитей ДШ-В 0,05%. Однако периоды радиальных и продольных колебаний в рассматриваемой конструкции камеры оказались близки (0,50 и 0,57 мс соответственно). Возможно, что именно этим обстоятельством объясняется явление «раскачки», наблюдаемое, как будет показано ниже, при взрывах.

Экспериментальное изучение деформаций корпуса взрывной камеры. На рис. 1 приведена типичная серия осциллограмм, записанных при тензометрическом измерении радиальной деформации цилиндрической части корпуса камеры при взрыве в ней связки из четырех нитей ДШ-В. Здесь и в дальнейшем обозначения (1—6) соответствуют датчикам в той последовательности, в которой они расположены вдоль образующей корпуса.

Измерения показывают, что частота основного тона радиальных колебаний цилиндрической части корпуса камеры составляет в пределах точности измерений 2 кГц, что соответствует результатам расчета. Осциллограммы показывают также, что стенки камеры подвергаются деформациям, имеющим частоту, превышающую основную в 1,5—2 раза. Но амплитуда высокочастотных колебаний значительно меньше амплитуды колебаний основного тона. Существенно также, что высокочастотные колебания развиваются, как правило, не с самого начала процесса, т. е. не с момента прихода ударной волны к стенке камеры, а возникают позднее, когда колебания основного тона начинают затухать. Появление высокочастотных колебаний можно объяснить переходом

дом энергии колебаний основного тона в колебания более высоких гармоник за счет осевой асимметрии конструкции, вызванной неравномерностью толщины стенок камеры, наличием технологических боковых фланцев, швов и т. д.

Максимальная деформация стенок камеры, измеренная во время первой пульсации, соответствует расчетной. На рис. 2 приведены значения максимальной относительной деформации ε_1 , измеренные в различных сечениях корпуса камеры. Здесь же сплошной линией отображена расчетная зависимость ε_1 от количества нитей ДШ-В в связке, построенная по данным таблицы.

Систематическое отклонение экспериментальных значений от расчетных в сторону уменьшения на 20—30% наблюдается при взрыве относительно больших зарядов (5—6 нитей ДШ-В). Такое расхождение для предельных деформаций можно объяснить завышением расчетных значений нагрузок, которое делалось при выборе вида функции $p(t)$ в формуле (6). Возможно, здесь сказывается, что увеличение количества нитей ДШ-В в связке в расчете отождествляется с соответствующим увеличением распределенной энергии шнурового заряда. Однако ДШ-В имеет систему оплетки и соединение нескольких нитей шнура ведет к рассредоточению заряда, уменьшению параметров образующейся в этих условиях воздушной ударной волны [10, 11].

Существенный результат исследования: практически на всех осциллограммах импульс деформации, возникающий во время первых пульсаций стенок камеры, не является абсолютно максимальным. Примерно через 20—40 мс после начала движения стенки камеры «раскачиваются» и деформации, превышающие первую по амплитуде в ряде случаев более чем в два раза, появляются во всех сечениях (на рис. 1 отмечено стрелками).

На рис. 3 приведено измеренное во всех сечениях время появления максимальной деформации t_{\max} , считая с момента прихода к стенке фронта ударной волны. Как следует из графика, с увеличением мощности взрыва время появления максимальных деформаций «раскачки» уменьшается. Исключение составляет случай со взрывом связки из шести нитей ДШ-В, однако результаты опытов здесь оказывались ненадежными, так как датчики из-за большой перегрузки нередко повреждались, а величина импульсов оказывалась столь большой, что могли появляться нелинейные эффекты на тракте передачи сигналов.

На рис. 4 представлены результаты измерения максимальной относительной деформации ε_{\max} корпуса камеры, возникающей во время «раскачки». Как следует из графика, превышение максимальной деформации над первичной достигает 100—150% при взрывах относительно малых зарядов и уменьшается до 30—40% в случае взрыва 5—6 нитей ДШ-В. То, что «раскачка» возникает через 20—40 мс после прихода ударной волны к боковым стенкам камеры, не позволяет объяснить ее появление повторным ударом отраженной волны, так как

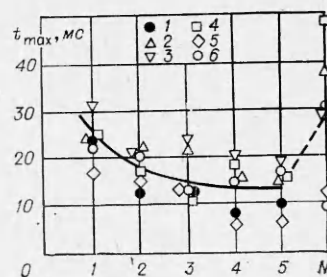


Рис. 3. Время появления деформации «раскачки» t_{\max} в различных сечениях корпуса взрывной камеры в зависимости от N .

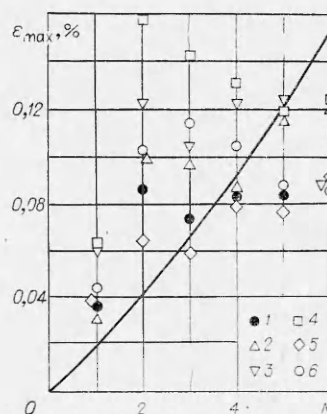


Рис. 4. Значения максимальной относительной деформации «раскачки» ε_{\max} в зависимости от N .

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-