

3. Л. В. Альтшулер, Б. С. Чекин. Докл. на I Всесоюзном симпозиуме по импульсным давлениям. Т. 1. М., 1974.
4. J. Tasi. JAP, 1973, 44, 10, 4569.
5. В. Ф. Анисичкин. ПМТФ, 1978, 3, 117.
6. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 2, 152.
7. M. van Thiel, B. J. Alder. Mol. Phys., 1966, 10, 427.
8. M. Ross, F. H. Ree, R. N. Keeler. Proceedings of the Fourth International Conference on High Pressure. Kyoto, 1974.
9. J. W. Stewart. J. Phys. Chem. Sol., 1956, 1, 146.
10. M. S. Anderson, C. A. Swenson. Phys. Rev., 1974, 10, 5184.
11. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
12. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова и др. ЖЭТФ, 1977, 73, 5 (11), 1866.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧКИ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ

В. М. Корнев, В. В. Адищев, А. Н. Митрофанов, В. А. Грехов
(Новосибирск)

В настоящее время опубликовано небольшое количество работ, содержащих данные по измерениям деформаций на моделях взрывных камер и в реальных камерах. Краткий обзор этих работ, а также качественная интерпретация результатов даны в [1]. В [2] обнаружено повышение амплитуд деформаций в процессе колебаний («раскачка») и справедливо отмечено, что оно «связано со сложным колебательным процессом всей конструкции», так как не может быть объяснено повторным ударом отраженной волны. К сожалению, в этой работе регистрировались только окружные деформации на цилиндрической части камеры.

В настоящей работе приводятся результаты измерений, полученные при испытаниях цилиндрической взрывной камеры со сферическими днищами. Регистрировались деформации наиболее характерных участков внешней поверхности камеры, обнаруженных в работе [1] на основе анализа процесса деформирования оболочки. Деформации замерялись как в окружном, так и в осевом направлениях.

Экспериментальным путем обнаружено резкое повышение изгибных деформаций вблизи фланца взрывной камеры — краевого эффект. Явление краевого эффекта при свободных колебаниях оболочек теоретически впервые исследовалось в [3], а в [1] указано на необходимость его учета при расчете взрывных камер. В окрестности полюсов сферических днищ деформации также резко возрастают. Появление пиков здесь, по-видимому, является следствием сложения нескольких форм колебаний, имеющих сравнимые собственные частоты. Плотность спектра частот собственных колебаний сферической оболочки выше, чем цилиндрической [4].

На рис. 1 схематически изображена взрывная камера, на которой проводились эксперименты. Это цилиндр диаметром 0,75 м, длиной 1,1 м, толщина стенки 0,012 м. К торцам цилиндра приварены массивные фланцы. К одному из фланцев днище, изготовленное из сферического сегмента с радиусом кривизны 0,665 м, крепится болтами, к другому — бойонетным затвором. Толщина днища 0,008 м. Общая длина камеры 1,6 м.

Места наклейки датчиков показаны на рис. 1, 1—8. Использовались тензодатчики типа 2ПКБ — 20×200 (Ом), включенные по потенциометрической схеме. Электрические сигналы, возникавшие в датчиках при колебаниях оболочки камеры после подрыва заряда ВВ, поступали по измерительным кабелям на входы четырех высокочувствительных двухлучевых осциллографов С1-17 или С1-18. Изображения на экране осциллографов регистрировались фотоаппаратами «Зенит». Синхронизация разверток изображений обеспечивалась одновременным замыканием при подрыве заряда специальных контактов, которые до подрыва вводились в массу заряда.

В качестве ВВ использовались заряды гексогена весом 0,5; 0,8 и 1 Н в пакетах условно сферической формы. При всех подрывах заряды располагались в центре камеры.

Цель испытаний взрывной камеры — определение максимально допустимого веса заряда ВВ. Поэтому датчики располагались только в окрестности характерных точек, определенных на основе анализа деформирования взрывных камер, проведенного в [1]. Поскольку соединение цилиндра с фланцем выполнено в виде галтели, датчик 6 наклеен на расстоянии 0,01 м от фланца. Результаты проведенных измерений позволяют сделать конкретные выводы.

Как отмечалось выше, заряды имели условно сферическую форму, т. е. ВВ насыпалось в компакт-

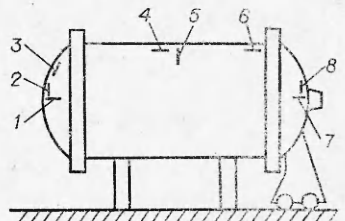


Рис. 1.

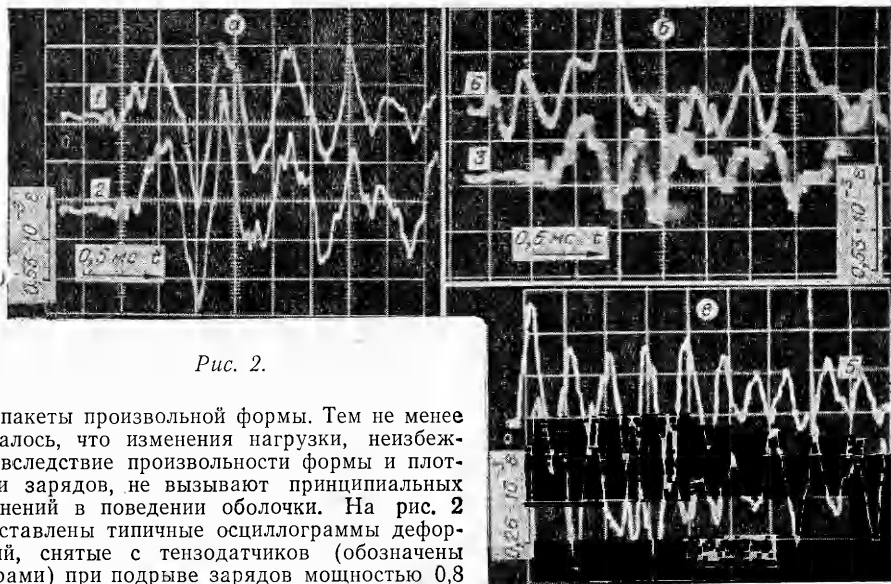


Рис. 2.

ные пакеты произвольной формы. Тем не менее оказалось, что изменения нагрузки, неизбежные вследствие произвольности формы и плотности зарядов, не вызывают принципиальных изменений в поведении оболочки. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы деформаций, снятые с тензодатчиков (обозначены цифрами) при подрыве зарядов мощностью 0,8 (а, б) и 1 Н (в). В сериях из трех-четырёх подрывов зарядов одинаковой мощности характер осциллограмм сохранялся, а разброс амплитуд не превышал 25%. Из сравнения осциллограмм деформаций, снятых с одних и тех же датчиков при подрывах зарядов разных мощностей, видно, что амплитуды растут примерно пропорционально увеличению веса заряда, а вид регистрируемых кривых и характерные частотные характеристики в основном сохраняются.

Таким образом, при нагрузках одного и того же типа характер деформирования оболочки определяется ее конструктивными параметрами, возбуждаются в основном одни и те же формы колебаний. При увеличении заряда амплитуды этих форм растут пропорционально, и поэтому характер сложения форм не меняется. В таблице приведены средние абсолютные значения максимальных деформаций ($\varepsilon_{\max} \cdot 10^3$), зарегистрированных в сериях подрывов зарядов различной мощности.

Из показаний датчиков 1, 2, 7, 8 следует, что наиболее высокие деформации возникают вблизи полюсов днищ. Сильные биения здесь можно объяснить сложением нескольких равноправных форм колебаний с близкими частотами и реализацией «эффекта бича» [1]. На внешней поверхности цилиндрической части камеры регистрировались окружные (датчик 5) и осевые (датчик 4) деформации в середине оболочки и осевые деформации вблизи фланца (датчик 6).

Осевые деформации являются следствием продольных колебаний и изгиба при радиальных колебаниях цилиндра. Частота свободных радиальных колебаний бесконечного цилиндра (или кольца)

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi,$$

где $\omega_0^2 = E/\rho R^2$; E — модуль Юнга; ρ — плотность материала цилиндра; R — радиус цилиндра. Спектр частот f_k свободных колебаний цилиндра длиной L при краевых условиях, близких к заземлению, определяется формулами

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi}, \quad \frac{\omega_k^2}{\omega_0^2} = 1 + \frac{\pi^4 R^2 h^2}{12(1-\nu^2)L^4} \left(2k - \frac{1}{2}\right)^4, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

(h — толщина оболочки, ν — коэффициент Пуассона). В работе [7] показано, что при воздействии на торец цилиндрической оболочки фронт волны распространяется со скоростью звука в стержне. При приближенном определении частот свободных продольных колебаний это дает основание считать цилиндрическую часть камеры стержнем

Номер датчика	Вес заряда, Н			Номер датчика	Вес заряда, Н		
	0,5	0,8	1		0,5	0,8	1
1	0,9	1,3	2,1	5	—	—	0,7
2	1,0	1,3	1,9	6	0,7	1,5	1,9
3	0,8	1,0	1,3	7	0,9	1,3	2,0
4	—	—	0,6	8	0,9	1,1	—

(с площадью сечения, равной площади сечения цилиндра), на одном конце которого закреплена масса m , моделирующая днище с фланцем.

Поскольку одно из днищ жестко соединено с открывающим устройством, второй конец стержня можно считать жестко закрепленным. Частоты f_k^m

свободных колебаний для такой системы определяются формулами (M — масса цилиндра) [5]:

$$f_k^m = \frac{\omega_k^m}{2\pi}, \quad \omega_k^m = \frac{x_k}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

$$\text{ctg } x_k = m/M \cdot x_k, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots$$

В настоящем случае $E=2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $\rho=7,8 \cdot 10^3$ Н·с²/м⁴; $m/M \approx 1,5$; $R=0,375$ м; $L=1,1$ м. Тогда $f \approx 2150$ Гц, $f_0^m \approx 530$ Гц, $f_1^m \approx 2100$ Гц. Первые пять значений частот f_k ($k=1, 2, 3, 4, 5$) не превышают $1,5 f_0$. Значения f_k^m ($k=1, 2, 3, \dots$) практически совпадают с частотами свободных колебаний стержня с закрепленными торцами, а f_0^m есть, по-видимому, частота колебаний присоединенной массы.

Таким образом, частоты продольных и радиальных колебаний, реализация которых возможна при подрыве заряда ВВ внутри камеры, близки друг к другу. Осциллограммы, снятые с датчиков 4, 5 (см. рис. 2, в), имеют вид кривых, получаемых при сложении нескольких гармоник. Причем датчик 5 (окружные деформации) регистрирует сложение меньшего количества форм колебаний и для него можно определить характерную частоту (около 2000 Гц), выделяя пересечения нулевого уровня в одной и той же фазе колебаний. Аналогичная характерная частота для датчика 4 (осевые деформации) «плавает» тоже вблизи значений 2000 Гц. Значения ϵ_{\max} (см. таблицу) для датчиков 4 и 5 мало отличаются друг от друга, но могут иметь разные знаки в один и тот же момент времени. В таком случае необходим учет неоднородности напряженно-деформированного состояния, поскольку если напряжения в двух ортотропных направлениях связаны соотношением $\sigma_1 = -\sigma_2$, то эквивалентное напряжение, по которому оценивается несущая способность,

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} = \sqrt{3} \sigma_1.$$

Значение ϵ_{\max} для датчика 6 (осевые деформации вблизи фланца) более чем в 2 раза превышает значения ϵ_{\max} , снятые с датчиков 4 и 5. Вклад продольных колебаний в показания, регистрируемые датчиками 4 и 6, должен быть примерно одинаковым, поэтому резкое повышение осевых деформаций вблизи фланца можно объяснить лишь сильным изгибом, т. е. ярко выраженным краевым эффектом. Таким образом, изгибными деформациями не только нельзя пренебрегать, но они могут быть определяющими при оценке несущей способности камеры, если она должна работать в упругом состоянии.

При подрывах зарядов весом 1 Н в днищах и вблизи фланцев фиксировались значения ϵ_{\max} , превышающие в 2,5 раза деформации, соответствующие статическому пределу пропорциональности при одномерном напряженном состоянии. Даже с учетом повышения предела текучести при динамическом нагружении материал оболочки должен был переходить в пластическое состояние. Тем не менее остаточные деформации обнаружены не были. Как следует из работы [6], пластические деформации, регистрируемые в процессе колебаний могут значительно превышать остаточные. Это является следствием эффекта Баушингера. Более того, при изгибных колебаниях пластические деформации реализуются лишь в поверхностных слоях, которые при многократных нагружениях будут изменять свою структуру, разрыхляться, а реальная толщина несущего слоя оболочки будет соответственно убывать. Разрушение от высоких циклических изгибных напряжений должно иметь усталостный характер.

Поступила в редакцию
18/XII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Адищев, В. М. Корнев. ФГВ, 1979, 15, 6.
2. А. А. Бузуков. ФГВ, 1976, 12, 4, 605.
3. В. В. Болотин. ПММ. 1960, 24, 5, 831.
4. В. В. Болотин. Прикл. мех., 1972, 8, 4, 3.
5. С. П. Стрелков. Введение в теорию колебаний. М., «Наука», 1964.
6. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ПМТФ, 1968, 6, 94.
7. Т. Л. Джирс. Тр. Амер. об-ва инж.-мех., сер. Е, Прикл. мех., т. 39, № 2, 1972.