

Таким образом, полученные в статье простые соотношения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [1, 2, 5] и могут быть использованы при оценке остаточных деформаций цилиндрических оболочек, вызванных локальным действием импульса внутреннего давления.

Поступила в редакцию 8/1 1982,  
после доработки — 1/II 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Могилев, А. Г. Иванов и др. ФГВ, 1981, 17, 2.
2. В. А. Могилев, А. Г. Иванов, Ю. А. Фатеев. ФГВ, 1981, 17, 5.
3. А. А. Найда. Прикладная механика, 1982, 18, 1.
4. А. Р. Ржаницы. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. М.: Стройиздат, 1954.
5. А. Г. Иванов и др. ФГВ, 1974, 10, 4.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

*В. А. Мальцев, Ю. А. Конон, В. В. Адищев, В. М. Корнев*  
(Барнаул, Новосибирск)

Известно, что оценка напряжений, действующих в оболочках при импульсном нагружении, выполненная на основе решения задачи о колебаниях равномерно нагруженных идеально сферических и цилиндрических оболочек [1, 2], дает заниженные значения по сравнению с экспериментальными данными [3, 4]. В настоящее время имеются теоретические работы [3, 5, 6], из которых следует, что отмеченное различие расчетных и экспериментальных данных обусловлено суперпозицией ряда форм колебаний, возбуждаемых при импульсном нагружении, т. е. реальная оболочка должна рассматриваться как система со многими степенями свободы. Известны решения задач о поведении тонких оболочек при импульсном нагружении [7] в виде разложений в ряды по ортогональным функциям, что приводит к необходимости учета до шестисот членов рядов. Последнее обстоятельство снижает практическую ценность таких расчетных формул, поскольку малое изменение параметров нагрузки должно приводить к неконтролируемому изменению амплитудных коэффициентов.

Решения, полученные в виде разложений в ряды по собственным формам колебаний, менее громоздки и хорошо интерпретируемы [3, 8]. Однако и в данном случае для практических вычислений необходим критерий для корректного ограничения числа членов ряда (числа степеней свободы, каждой степени свободы соответствует своя собственная форма колебаний). Расчет напряжений, действующих в реальной оболочечной конструкции, можно значительно упростить, если будут известны наиболее вероятные формы возбуждаемых колебаний и интенсивность последних, а следовательно, необходимо проведение цикла целенаправленных экспериментов.

В настоящей работе приводятся данные экспериментального изучения процесса деформирования заполненной воздухом тонкостенной сферической оболочки под воздействием ударной волны центрально-расположенных сосредоточенных зарядов, частотный анализ возбуждаемых в оболочке форм колебаний, а также оценка уровня действующих в ней изгибных и мембранных напряжений.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Стальная сферическая оболочка диаметром 2 м со стенкой толщиной 8 мм для обеспечения осесимметричного деформирования установлена люком на металлической подставке массой 120 кг и жесткостью 700 МН/м (рис. 1). Люк оболочки представляет собой цилиндрическую обечайку диаметром 0,8 м со стенкой толщиной 8 мм, усиленную фланцем толщиной 25 мм. Усиление зоны сопряжения люка с оболочкой, выполненное в виде кольца из листа толщиной 8 мм, при проведении экспериментов удалено от окрестности размещения тензорезисторов.

Оболочка нагружалась подрывом сосредоточенных зарядов, расположенных в ее геометрическом центре, при этом отклонение центра заряда от центра оболочки не превышало 5 мм. В качестве ВВ использовали аммонит 6ЖВ, имеющий скорость детонации  $3,8 \div 4,5 \cdot 10^3$  м/с, плотность  $900 \text{ кг/м}^3$ , критический диаметр 12—14 мм [9]. Заряды подрывали электродетонаторами типа ЭД № 8. Деформацию оболочки измеряли проволочными тензорезисторами типа ПКП-15-100, расположенными на оболочке в меридиональном и широтном направлениях в соответствии со схемой (рис. 2). Тензорезисторы включали в измерительную систему, состоящую из четырехканальных тензометрических усилителей типа УТ 4-1, двенадцатиканального светолучевого осциллографа Н-117, синхронизирующего устройства, обеспечивающего синхронность подачи тока в цепь электродетонатора с работой лентопротяжного механизма осциллографа. Описанная измерительная схема обеспечивала измерение деформации с относительной погрешностью не более  $\pm 8\%$  в полосе частот  $(0 \div 2) \cdot 10^3$  Гц.

Тензорезисторы наклеивали на внутреннюю и наружную поверхности оболочки, что при соответствующем включении [10] обеспечивало раздельную регистрацию мембранных и изгибных деформаций, которые по известным зависимостям пересчитывали в напряжения [11]. Для защиты тензорезисторов от воздействия ударной волны, продуктов взрыва, влаги, электрических наводок применяли экран специальной конструкции.

Как следует из полученных осциллограмм, типичные из которых приведены на рис. 3, деформирование оболочки вследствие симметрии схемы нагружения начинается одновременно по всей ее поверхности. Деформационные зависимости имеют сложный характер, свидетельствующий о возбуждении в оболочке ряда близких по частоте форм колебаний [12], что предсказано теоретически [3].

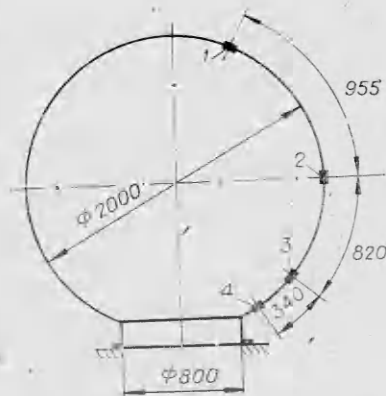


Рис. 2. Схема размещения тензорезисторов (1—4 — точки измерений).

Рис. 1. Сферическая оболочка на опорной конструкции.

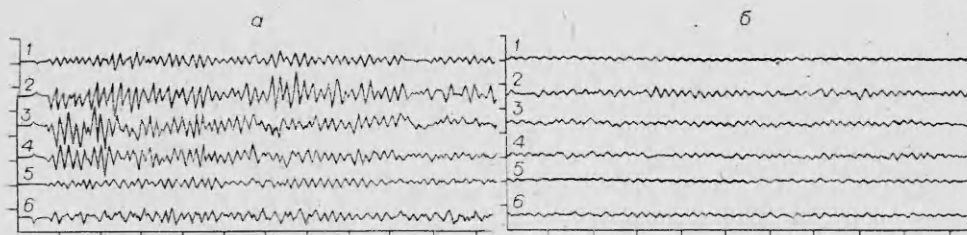


Рис. 3. Осциллограммы процесса деформирования сферической оболочки (аммонит 6ЖВ; масса 0,2 кг).

а) начальный период; б) через  $8 \cdot 10^{-2}$  с от начала погружения,  $\mu_t \cdot 2 \cdot 10^{-3}$  с/дел,  $\mu_{\text{ср}} \cdot 0,56 \cdot 10^{-4}$  ед/дел.

Наблюдаемая на осциллограммах частота колебаний (1250—1450 Гц) близка к частоте собственных радиальных колебаний тонкой сферической оболочки (1400 Гц), найденной по зависимости [13]

$$f = \frac{1}{\pi R} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\mu)}}, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус оболочки;  $\rho$ ,  $E$ ,  $\mu$  — соответственно плотность материала оболочки, его модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Как следует из осциллограмм, значительный вклад в формирование деформационного процесса вносят изгибные деформации. Соотношение между изгибными и мембранными напряжениями, наблюдаемое к моменту достижения первого максимума деформации ( $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$  с), неодинаково для различных областей оболочки и зависит от ориентации тензорезисторов (рис. 4). Так, в меридиональном направлении мембранные напряжения вблизи от люка превышают изгибные в 2 раза. По мере удаления от люка амплитуда изгибных напряжений быстро уменьшается. На гладкой части оболочки уровень изгибных напряжений не превышает 15% от мембранных, уровень которых по мере удаления от люка остается неизменным.

В широтном направлении вблизи люка также преобладают мембранные напряжения, причем последние в 2,5 раза превышают мембранные напряжения, действующие в меридиональном направлении. Изгибные напряжения в широтном направлении на порядок меньше мембранных и быстро уменьшаются при удалении от люка. Соотношение между величинами мембранных напряжений, действующих во взаимно перпендикулярных направлениях, уменьшается с 2,5 вблизи люка до 1 в экваториальной зоне.

Максимальная амплитуда деформации регистрируется в различных точках оболочки неодновременно, длительность задержки появления максимума варьируется от 3 до 25 мс. В момент достижения максимума в рассматриваемой точке гладкой части поверхности оболочки деформации во взаимно перпендикулярных направлениях могут быть либо близкими по величине, либо по одному из направлений деформация близка к нулю. Уровень максимальных изгибных напряжений сопоставлен с мембранными по абсолютной величине в табл. 1. Вблизи люка, по сравнению с гладкой частью оболочки, наблюдается увеличение и изгибных, и мембранных напряжений (динамический краевой эффект) [14]. Отношение мак-

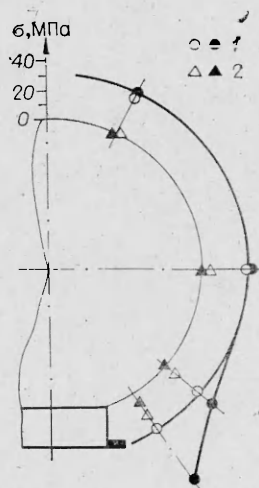


Рис. 4. Распределение мембранных (1) и изгибных (2) напряжений в оболочке в момент достижения первого максимума деформации (светлые точки — меридиональное направление, темные — широтное).

Т а б л и ц а 1

Расположение точки измерения (см, рис. 2)	Напряжение, МПа		
	мембранные	изгибные	суммарные
1	+32,4	+37,5	+69,9
	-27,2	-35,6	-62,8
2	+31,3	+36,0	+66,3
	-28,0	-35,2	-63,2
3	+27,3	+36,2	+63,5
	-26,5	-38,4	-64,9
4	+54,5	+67,5	+112,0
	-38,7	-59,6	-98,3

симметричных растягивающих напряжений, действующих в оболочке, к напряжению первого максимума деформации составляет  $1,5 \div 2,6$ .

Из рассмотрения осциллограмм изгибных форм колебаний, согласно рекомендациям [12], следует, что в формировании результирующей кривой участвует не менее трех форм колебаний, о чем свидетельствует несимметричность огибающих, проведенных по вершинам и впадинам. Из неравенства нулю амплитуды колебаний в «талиях» биений следует неравенство амплитуд изгибных форм.

Разложение зарегистрированных деформационных зависимостей с целью установления амплитуд составляющих форм колебаний затруднено, так как наблюдаемый процесс затухающий, однако частоты изгибных форм могут быть определены, например, методом огибающих [12]. В рассматриваемом случае на каждой осциллограмме нетрудно выделить характерные участки, разделенные «талиями», длительность которых позволяет определить разность частот форм, образующих биение, по зависимости

$$f_1 - f_2 = 1/T_{1,2},$$

где  $T_{1,2}$  — промежуток времени между «талиями», отделяющими найденные характерные участки осциллограмм. Проведенная обработка показала, что частоты изгибных форм колебаний отличаются от основной частоты на 60, 70, 260 и 290 Гц.

Поскольку изгибные напряжения, действующие в поверхностных слоях оболочки, имеют противоположные знаки, то для напряжений на ее наружной  $\sigma_n$  и внутренней  $\sigma_s$  поверхностях можно записать

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_{\max}^M + \sigma_n, \\ \sigma_s &= \sigma_{\max}^M - \sigma_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max}^M$  — максимальная величина действующих в оболочке мембранных напряжений;  $\sigma_n$  — изгибные напряжения.

Для оценки прочности конструкции, материал которой находится в неоднородном напряженно-деформированном состоянии, обычно применяются различные теории прочности [11]. В рассматриваемом случае наиболее приемлема четвертая теория, в соответствии с которой напряжения, действующие в оболочке, должны удовлетворять неравенству

$$\sigma_{\text{экв}} < \sigma_d,$$

где  $\sigma_d$  — допустимые напряжения;  $\sigma_1, \sigma_2$  — главные напряжения, действующие во взаимно перпендикулярных направлениях, а  $\sigma_{\text{экв}}$  определяется формулой

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2}. \quad (3)$$

Очевидно, что в реальной конструкции вследствие неравенства частот различных изгибных форм колебаний могут быть реализованы следующие ситуации: 1) главные напряжения близки по величине и имеют одинаковый знак, следовательно,  $\sigma_{\text{экв}} \approx \sigma_1 \approx \sigma_2$ ; 2) изгибные напряжения, действующие во взаимно перпендикулярных направлениях, имеют противоположные знаки, а поскольку изгибные и мембранные напряжения близки по величине, то  $\sigma_1 = \sigma_{\max}^M + \sigma_n$ ,  $\sigma_2 = \sigma_{\max}^M - \sigma_n \approx 0$ ,  $\sigma_{\text{экв}} \approx \sigma_1$ .

Таким образом, при импульсном нагружении сферической оболочечной конструкции подрывом центрально-расположенных сосредоточен-

Таблица 2

Номер луча	Номер датчика	Вид регистрируемой деформации
1	2	Изгибная
2	2	Суммарная
3	4	»
4	4	Изгибная
5	3	»
6	3	Суммарная

Таблица 3

Временной интервал изменения частот колебаний, с	Частоты колебаний, Гц			
	0 ÷ 6 · 10 <sup>-2</sup>	1520	1580	1780
8 ÷ 14 · 10 <sup>-2</sup>	1440	1510	1540	1680

ных зарядов максимальные эквивалентные напряжения можно считать равными максимальным действующим, причем последние превышают оценки, полученные в идеальной постановке [1, 2], в 2—3 раза (см. (3)).

Анализ осциллограмм в области их затухания показал, что деформационные кривые имеют более регулярный характер, т. е. отсутствуют резкие пики деформации (см. рис. 3, б и табл. 2). Наблюдаемые кривые имеют характер квазирегулярных биений, причем амплитуда в «талиях» близка к нулю. Сравнение видимых частот колебаний, а также частот биений в начале и в конце цикла нагружения выявило снижение частоты колебаний по мере удаления от момента нагружения (табл. 3). Это явление связано с тем, что в различные интервалы времени доминирующими (имеющими наибольшую амплитуду) являются различные группы форм колебаний, т. е. вследствие параметрической неустойчивости происходит обмен энергией между первоначально возбужденными формами и развивающимися в процессе колебаний оболочкой.

Явление параметрической неустойчивости колебаний сферической оболочки теоретически рассмотрено в работе [15], где отмечена опасность возбуждения «локальных изгибных форм» высокой интенсивности при определенных соотношениях между частотами собственных колебаний (параметрический резонанс). Однако в описанных выше экспериментах существенного увеличения амплитуды какой-либо формы не обнаружено, что, по-видимому, связано с влиянием конструкционного демпфирования.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований установлено<sup>1</sup>:

1) существенный вклад в напряженно-деформированное состояние тонкой сферической оболочки вносят изгибные формы колебаний, максимальные напряжения от которых сопоставимы по абсолютной величине с максимальными мембранными напряжениями;

2) число изгибных форм колебаний, возбуждаемых в исследованной реальной оболочке при импульсном нагружении, ограничено, а их частоты отличаются от частоты основной формы колебаний не более чем на 20%;

3) в момент достижения первого максимума деформации, вследствие симметрии конструкции и схемы нагружения, напряженное состояние на гладкой части оболочки может считаться безмоментным, поскольку изгибные напряжения существенны только в окрестности люка (динамический краевой эффект);

4) верхняя оценка уровня эквивалентных напряжений в реальной оболочке в 2—3 раза выше оценки Бейкера — Демчука;

5) экспериментально подтверждено существование параметрической неустойчивости колебаний сферической оболочки.

Поступила в редакцию 18/XI 1982,  
после доработки — 24/V 1983

<sup>1</sup> Выводы носят оценочный характер, так как сделаны на основе анализа процесса деформирования одной конкретной оболочечной конструкции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. W. E. Baker. Proc. of the Third U. S. National Congress of Applied Mechanics. ASTM, 1958.
2. А. Ф. Демчук.— В кн.: Второй международный симпозиум. Обработка металлов взрывом. Т. 2. Прага, 1974.
3. В. В. Адичев, В. М. Корнев. ФГВ, 1979, 15, 6.
4. В. М. Корнев, В. В. Адичев, А. Н. Митрофанов и др. ФГВ, 1979, 15, 6.
5. W. E. Baker. J. of Acoust. Soc. of America. 1964, 33, 12.
6. В. Е. Бейкер, В. Ху, Т. Джексон. Тр. амер. об-ва инж.-мех. Сер. Е. Прикл. мех., 1966, 34, 4.
7. А. П. Филлипов, С. С. Кохманюк, Е. Г. Янютин. Деформирование элементов конструкций под действием ударных и импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1978.
8. В. В. Адичев, В. М. Корнев.— В кн.: Пятый всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Алма-Ата, 1981.
9. П. В. Дубнов, Н. С. Бахаревич, А. И. Романов. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.
10. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие/Под ред. Р. А. Макарова. М.: Машиностроение, 1975.
11. Г. С. Писаренко, В. А. Агарев и др. Сопротивление материалов. Киев: Техника, 1967.
12. Р. Мэнли. Анализ и обработка записей колебаний. М.: Машиностроение, 1972.
13. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах/Под ред. А. И. Биргера. М.: Машиностроение, 1968.
14. В. В. Болотин. ПММ, 1960, 24, 5.
15. Н. П. Мельников, В. И. Малый, С. В. Базилевский. Тр. ЦНИИПроектстальконструкция. М., 1980.

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ УДАРНОГО СЖАТИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВВ

*Ю. М. Ковалев*

*(Томск)*

В настоящее время в литературе имеются экспериментальные данные по ударным адиабатам ряда ВВ [1, 2], получен вид универсальной ударной адиабаты [3], предложено несколько уравнений состояния для конкретных ВВ [4, 5]. Теоретическое определение зависимостей, характеризующих поведение твердых ВВ, осложняется тем, что они относятся к молекулярным кристаллам и обладают большим числом внутренних степеней свободы. При построении уравнений состояния и расчете температур ударного сжатия ВВ в [3] использована модель молекулярного кристалла, подробно описанная в [6], где выделяется три степени свободы на молекулу, зависящие от объема. Оправданность такого расщепления сомнительна, так как для описания поведения молекулы требуются три координаты центра тяжести и три угла Эйлера. Все эти координаты существенно зависят от пространственного расположения окружающих молекул в кристалле, т. е. от объема.

В [7] уравнения состояния строятся на основе модели молекулярного кристалла с выделением шести степеней свободы на молекулу, зависящих от объема, и указывается на возможность деформации молекулы при наличии кристаллического поля. Следовательно, необходимо учитывать зависимость не только частот нормальных колебаний молекулы как целого от объема, но и изменение частот «деформационных» колебаний, например колебания нитрогрупп.

В данной работе предложен метод построения уравнений состояния, учитывающий сложную внутреннюю структуру ВВ. Термодинамические свойства вещества полностью определяются, если известен один из термодинамических потенциалов. Удобно исходить из определения свободной энергии Гельмгольца  $F(v, T)$ , которая наиболее простым образом связана с моделью строения вещества