

О РАЗРУШЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН

М. А. Ильгамов, А. В. Садыков

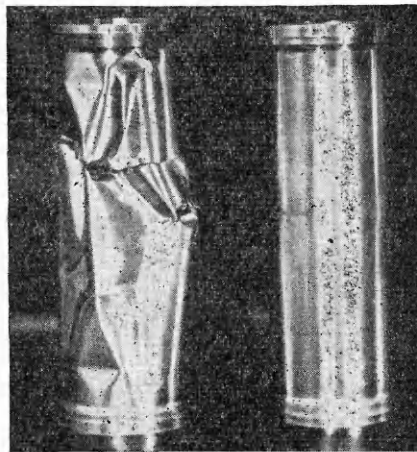
(Казань)

Известно, что в закрытой трубе, на одном конце которой задано синусоидальное движение поршня, возникают нелинейные продольные колебания, которые вблизи собственных частот переходят в периодические ударные волны [1—13]. Аналогичные колебания возникают при неустойчивой работе камер сгорания двигателей [14—16]. В проведенных до сих пор экспериментах амплитуда достигала 0,36 бар при среднем давлении в трубе 1 бар [4, 8, 13]. Вынужденные осесимметричные колебания тонкостенных оболочек под действием периодических ударных волн внутри их полости изучались в работе [17]. Для них характерна относительно хорошая несущая способность. Это объясняется тем, что колебания сопровождаются преимущественно растяжением — сжатием сечения оболочки. Кроме того, эксперименты проводились при частотах, близких к собственным частотам газового столба $\omega_k = k\pi a/L$ (для получения ударных волн в газе) и далеких от собственных частот осесимметричных колебаний оболочки $\Omega_i \approx \Omega_s \approx c/R$. Здесь a и c — скорости распространения звука в газе и оболочке; L , R — общая длина трубы и радиус срединной поверхности оболочки.

Для оболочек с наиболее употребительными размерами последнее условие всегда соблюдается. В настоящее время не существуют поршневые машины с достаточно высокими оборотами, чтобы можно было рассматриваемым здесь способом возбудить осесимметричные колебания оболочки преимущественно радиального типа.

Отличие от осесимметричных колебаний оболочки при колебаниях с волнообразованием по окружности оказывается чрезвычайно уязвимой к продольным волнам газа в ее полости. В результате волнообразования на поверхности оболочки с большой амплитудой усталостные трещины в ней возникают всего за 20—25 циклов после начала изгибных колебаний (после хлопка). Еще через несколько циклов оболочка полностью разрушается (фиг. 1).

Экспериментальное исследование этого явления проводилось на установке [17], которая состоит из автомобильного двигателя со снятой головкой, электромотора постоянного тока для привода во вращение коленчатого вала двигателя, ременной передачи и шкивов. Основная труба с толщиной стенки 3 мм и внутренним диаметром $2R = 82$ мм крепилась к цилиндру двигателя. На другом конце ее при помощи специальной муфты соединялась исследуемая тонкостенная оболочка. К концу последней привертывалась толсто-



Ф и г. 1

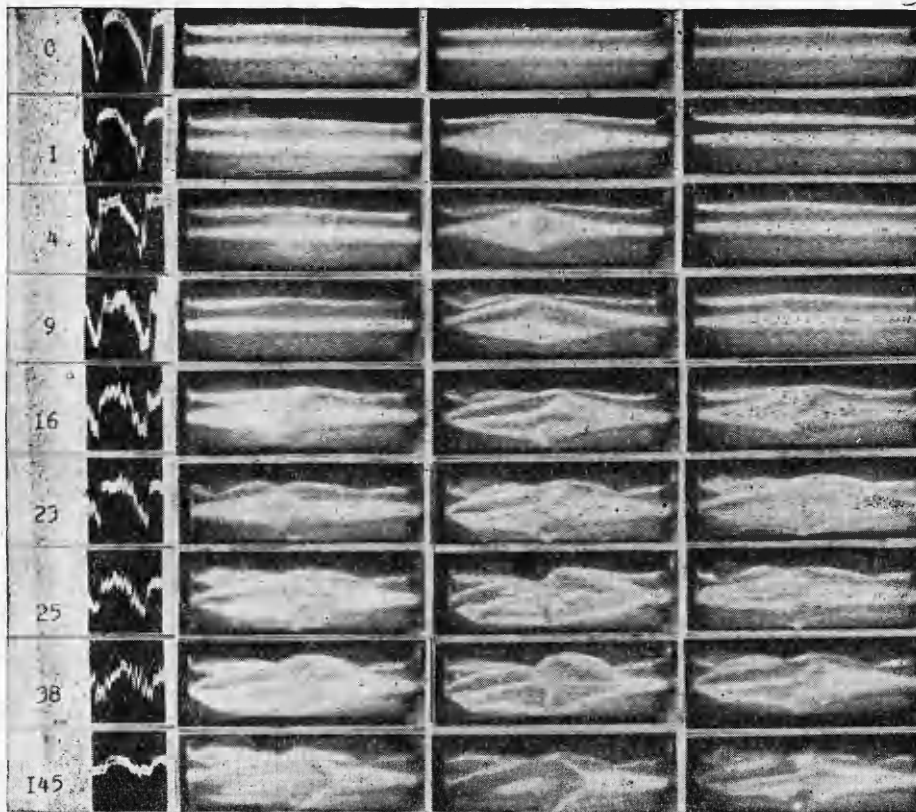
стенное днище. Общая длина воздушного столба 3530 мм. Температура воздуха до начала работы комнатная, давление 1 атм. Колебания в столбе воздуха создаются движением поршня двигателя, ход его 110 мм.

Особое внимание уделено точности изготовления испытуемых оболочек. Они вытачивались на токарном станке из дюралюминия Д16. При этом использовались специально изготовленные оправы для уменьшения деформаций при протачивании. Поверхности оболочек после токарной обработки подвергались тонкому шлифованию. Суммарное отклонение размеров из-за овальности, конусности и эксцентricности не превышало 0,015 мм, что составляет менее 10% толщины стенки. Контроль осуществлялся с помощью индикаторных часов с ценой деления 0,005 мм. Был изготовлен ряд оболочек с толщиной стенок от 0,19 до 0,25 мм.

Измерение колебаний давления в газе производилось при помощи пьезоэлектрических датчиков, установленных в нескольких местах по длине толстостенной трубы. Один датчик находился вблизи стыка с испытуемой оболочкой. Сигналы датчиков после усилителя У4-1 (через его низкоомный выход) подавались на шлейфовый осциллограф Н-102. Частота возбуждения определялась с помощью электронного частотомера ЧЗ-24 с ценой деления 1 Гц и параллельно контролировалась частотомером Ф 5080 с ценой деления 0,1 Гц. Тензодатчики для записи деформаций оболочки после начала изгибных колебаний сразу выходили из строя ввиду высоких уровней деформаций. Форму колебаний оболочки определяли скоростной кинокамерой СКС-1 (применялись скорости от 170 до 650 кадр/с). Оболочка освещалась двумя четырехламповыми осветителями.

Плавное повышение напряжения в электромоторе приводило к плавному увеличению оборотов двигателя и частоты возбуждения. Запись показаний частотомера и датчиков давления и запуск скоростной кинокамеры производились синхронно. До частоты возбуждения $0,9 \omega_1$, где ω_1 — низшая собственная частота столба воздуха, при которой происходит излом кривой в эпюре давления, совместные осесимметричные колебания газа и оболочки хорошо описываются линейной теорией. С появлением излома и разрывов давление может быть рассчитано только на основе нелинейных уравнений гидромеханики. Однако колебания оболочки все еще являются осесимметричными и далекими от резонансных и могут быть описаны линейными уравнениями. При этом взаимодействие между воздухом и оболочкой является слабым, так что показания датчиков давления мало отличаются от показаний в случае, когда испытуемая оболочка заменяется толстостенной трубой. Наконец, наступает такой момент, когда система оболочка — газ теряет устойчивость осесимметричных форм колебаний и по окружности появляется несколько волн.

На фиг. 2 приведены показания датчика давления (левый столбец) и кинокадры трех положений оболочки за цикл колебаний (правые столбцы). За каждый цикл колебаний производилось от 4 до 15 снимков; здесь приведены лишь снимки, соответствующие моменту максимального прогиба во внутрь (средний столбец) и моментам, когда оболочка стремится принять круговую форму. Через 0 обозначен последний цикл колебаний системы по осесимметричной форме, за которым следует цикл 1, когда произошло прохлопывание оболочки. Во всех испытанных оболочках по окружности появились 4 волны, а по длине одна полуволна. Картина до цикла 9 остается примерно одинаковой, увеличивается лишь амплитуда. С момента прохлопывания в эпюре давления появляется высокочастотная составляющая, а амплитуда имеет тенденцию к некоторому падению. Далее (циклы 16, 23) происходит резкое складкообразование, что уже не дает оболочке принять в определенные моменты круговую фор-



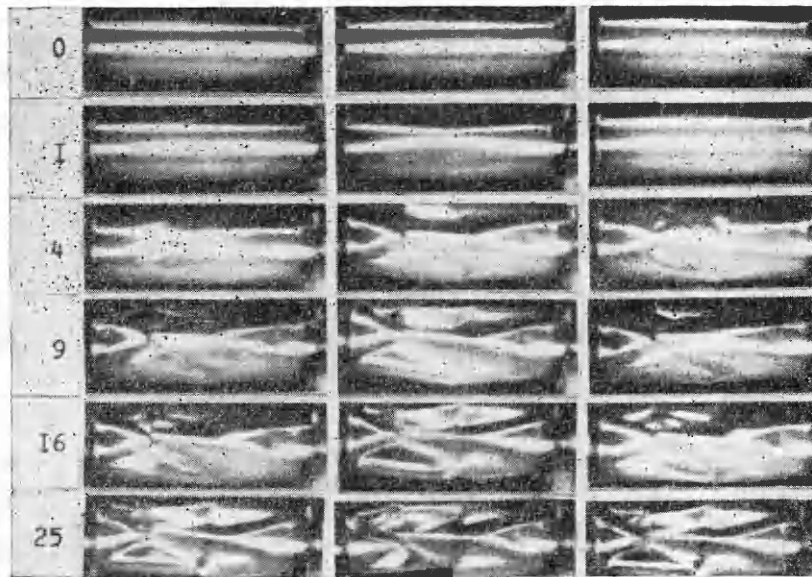
Ф и г. 2

му. На цикле 25 появление трещины приводит к снижению амплитуды давления. В дальнейшем давление в трубе резко падает (циклы 38, 145). Отметим, что максимальный разрыв в эпюре давления на установке достигал 0,72 бар.

Эти результаты относятся к оболочке со средней толщиной 0,23 мм. Для нее потеря круговой формы происходит при частоте возбуждения $f \approx 42,5$ Гц. В последующие 25—30 циклов ее можно считать неизменной. С уменьшением толщины оболочки разрушение ее происходит еще быстрее. На фиг. 3 приведены кинокадры для оболочки толщиной 0,21 мм, где волнообразование носит еще более бурный характер. Здесь остаточные вмятины появились на шестом цикле, на цикле 25 имеются уже сильно развитые трещины. Прохлопывание появилось около той частоты возбуждения, что и выше.

Оболочки из дюралюминия Д16 с толщиной стенки 0,28 мм и более при многочисленных испытаниях не теряли устойчивость круговой формы.

Следует отметить значительные трудности в проведении описанных опытов. В отличие от исследования осесимметричной формы колебаний системы, когда условия работы находятся в рамках правил техники безопасности, с момента первого прохлопывания оболочки появляется шум исключительно высокого уровня. Интенсивной вибрации подвергается не только сама установка, но и стены капитального трехэтажного здания, в полуподвальном помещении которого на изолированном бетонном фундаменте она находится. Все это затрудняет выполнение необходимых замеров.



Ф и г. 3

В настоящее время отсутствует теория взаимодействия оболочки и сжимаемой жидкости в рассмотренной здесь постановке. Отдельные попытки (например, в [18]) не могут претендовать на описание данного эксперимента, характеризующегося сильными нелинейностями в оболочке, газе и на подвижной поверхности их соприкосновения. Можно лишь указать, что число волн по окружности, соответствующее наименьшему собственному значению задачи об устойчивости цилиндрической оболочки под действием статического давления, близко тому количеству волн, которое получилось в эксперименте. Для материала оболочки с модулем упругости $E = 7,06 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$, плотностью $\rho = 2,77$ кг/м³ и размерами $R = 41$ мм, $l = 222$ мм, $h = 0,23$ мм по формуле [18]

$$n = \sqrt[4]{6\pi^2 \sqrt{1-\nu^2} \sqrt{R/l} \sqrt[4]{R/l}} = 4,38.$$

При толщине оболочки 0,21 мм число $n = 4,48$. Очевидно, влияние воздуха на число волн n мало.

Частота собственных колебаний оболочки, соответствующая форме с одной полуволной вдоль образующей и с четырьмя волнами по окружности, равна 218 Гц (для толщины 0,23 мм). Отношение ее к частоте возбуждения и, следовательно, к частоте прохождения ударных волн, при которой произошла динамическая потеря устойчивости (42,5 Гц), составляет 5. Это отношение сохраняется и для оболочек с меньшими толщинами. Вероятно, частота нелинейных колебаний, сопровождаемых за каждый цикл хлопком зоны вмятины и выхлопом, значительно меньше, чем частота линейных колебаний. В эксперименте она получилась равной частоте возбуждения (т. е. 42,5 Гц).

Поступила 24 VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Betchov R. Nonlinear oscillations of the column of a gas.— «Phys. Fluids», 1958, vol. 1, N 3.
2. Saenger R. A., Hudson G. E. Periodic shock waves in resonating gas columns.— «J. Acoust. Soc. America», 1960, vol. 32, N 8.
3. Горьков Л. П. Нелинейные акустические колебания столба газа в закрытой трубе.— «Инж. журн.», 1963, т. 3, вып. 2.
4. Гуляев А. И., Кузнецов В. М. Колебания газа с большой амплитудой в закрытой трубе.— «Инж. журн.», 1963, т. 3, вып. 2.
5. Chester W. Resonant oscillations in closed tubes.— «J. Fluid Mech.», 1964, vol. 18, pt 1.
6. Ingard U., Ising H. Acoustic nonlinearity of an orifice.— «J. Acoust. Soc. America», 1967, vol. 42, N 1.
7. Temkin S. Nonlinear gas oscillation in a resonant tube.— «Phys. Fluids», 1968, vol. 11, N 5.
8. Галиев Ш. У., Ильгамов М. А., Садыков А. В. О периодических ударных волнах в газе.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1970, № 2.
9. Collins W. D. Forced oscillations of systems governed by one-dimensional nonlinear wave equations.— «Quart. J. Mech. Appl. Math.», 1971, vol. 24, N 2.
10. Cruikshank D. B. Experimental investigation of finite amplitude acoustic oscillations in a closed tube.— «J. Acoust. Soc. America», 1972, vol. 52, N 3.
11. Jimenes B. J. Nonlinear gas oscillations in pipes.— «J. Fluid Mech.», 1973, vol. 59, pt 1.
12. Eninger J. S., Vincenti W. G. Nonlinear resonant wave motion of a radiating gas.— «J. Fluid Mech.», 1973, vol. 60, pt 1.
13. Sturtevant B. B. Nonlinear gas oscillations in pipes.— «J. Fluid Mech.», 1974, vol. 63, pt 1.
14. Bao Teh Chu, Ving S. J. Thermally driven nonlinear oscillations in a pipe with travelling shock waves.— «Phys. Fluids», 1963, vol. 6, N 11.
15. Brownlee W. G. Nonlinear axial combustion instability in solid propellant motors.— «AIAA J.», 1964, vol. 2, N 2.
16. Sirignano W. A., Crocco L. A shock waves model of unstable rocket combustors.— «AIAA J.», 1964, vol. 2, N 7.
17. Ильгамов М. А., Садыков А. В. Реакция цилиндрической оболочки на периодические ударные волны в ее полости.— «Изв. АН СССР. МТТ», 1973, № 2.
18. Ильгамов М. А., Сахабутдинов Ж. М. Параметрически возбуждаемые колебания цилиндрической оболочки, заполненной сжимаемой жидкостью или газом. Теория пластин и оболочек. М., «Наука», 1971.