

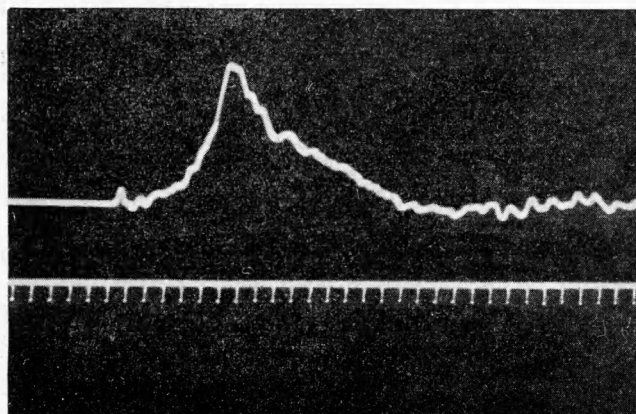
СЖАТИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ В ВОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

В. К. Кедринский, Р. И. Солоухин

(Новосибирск)

Особенности сжатия и пульсаций газовой полости в объеме жидкости важно знать при изучении таких явлений, как распространение волн сжатия в воде, содержащей пузырьки воздуха, пузырьковое воспламенение жидких ВВ от удара, гидродинамические процессы в кипящем слое, при кавитации и т. п. В качестве первого приближения радиальное движение стенок полости можно описать в рамках несжимаемой жидкости [1], если известны давление в жидкости и закон сжатия газа. Если давление за фронтом ударной волны не превосходит 100 атм, то время прохождения волной диаметра сферы на порядок величины меньше времени ее сжатия до минимального размера, поэтому в ряде случаев при расчете сжатия «длинной» волной давление в жидкости на некотором расстоянии от полости можно считать равным давлению за ударной волной. При этом необходимо также учитывать отражение на границе газа и жидкости, что приводит к искажению симметричной картины сжатия. Ниже будут описаны результаты опытов, в которых производилось фотографическое изучение процесса.

1. **Результаты опытов.** Оптическое изучение сжатия сферы проводилось в сосуде с водой размером $25 \times 25 \times 5$ см, боковые стенки которого были изготовлены из оптического стекла. Ударная волна создавалась



Фиг. 1

возле одной из торцевых стенок при помощи электровзрыва тонкой манганиновой проволоочки (0,07 мм), через которую разряжалась емкость в 110 мкф, заряженная до 600–900 в. На фиг. 1 показана оциллограмма давления волны взрыва, записанная импульсным пьезодатчиком, помещенным на место сферы. Длительность импульса около 100 мксек, амплитуда 10–20 атм. Введение проволоочки в разрядный промежуток приводит к хорошей повторяемости параметров ударных волн в различных опытах.

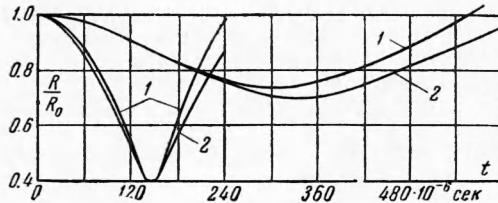
При помощи теневого прибора производилось фотографирование поля плотности вокруг полости и ее формы в различные моменты времени. Съем-

ка осуществлялась на вращающуюся пленку с прерывистым искровым освещением (частота съемки до 50 тыс. кадров в сек), а также методом развертки через узкую щель с непрерывной подсветкой импульсной лампой. Газовый пузырек диаметром $0,7 \div 2$ см ограничивался тонкой ($0,01$ мм) резиновой оболочкой, которая не оказывала существенного влияния на характер сжатия. На фиг. 2 показано несколько кадров сжатия пузырька. Из снимка можно видеть, что в процессе сжатия сфера постепенно теряет симметричную форму и образует выпуклость в сторону распространения волны. На фиг. 3 показана непрерывная развертка сжатия по направлению распространения ударной волны. На снимке видны волны сжатия и теневая проекция на щель стенок пульсирующего пузырька.

2. Расчет сжатия полости. Если считать сжатие газа адиабатическим, радиальное движение стенок сферической полости в неограниченной несжимаемой жидкости описывается уравнением

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left[p_{\infty} - p \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] \quad (1)$$

Здесь p_{∞} — давление жидкости на достаточно большом расстоянии от сферы. Если p_{∞} постоянно, уравнение решается относительно dR/dt , а закон изменения радиуса сферы во времени находится графическим интегрированием. Если p_{∞} изменяется во времени, уравнение (1) можно решить лишь численными методами. В случае, когда давление изменяется по закону



Фиг. 4

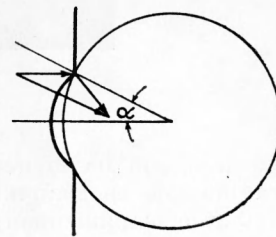
$$p_{\infty} = A p_0 \exp \left(- \frac{t}{\tau} \right)$$

решение уравнения (1) было проведено на электронной вычислительной машине [2].

Опытные данные (кривая 2 на фиг. 4) для сжатия вдоль направления движения ударной волны при $A = 10$ и $R_0 = 1$ см и $0,35$ см сравниваются с результатами вычислений для $\tau = 100$ мксек (кривая 1 на фиг. 4). Как видно из этих графиков, в целом сжатие сферы соответствует симметричному движению в несжимаемой жидкости. Это позволяет при анализе несимметричного движения в качестве приближения сохранить выражение для давления внутри полости в виде $p_0 (R_0/R)^{3\gamma}$.

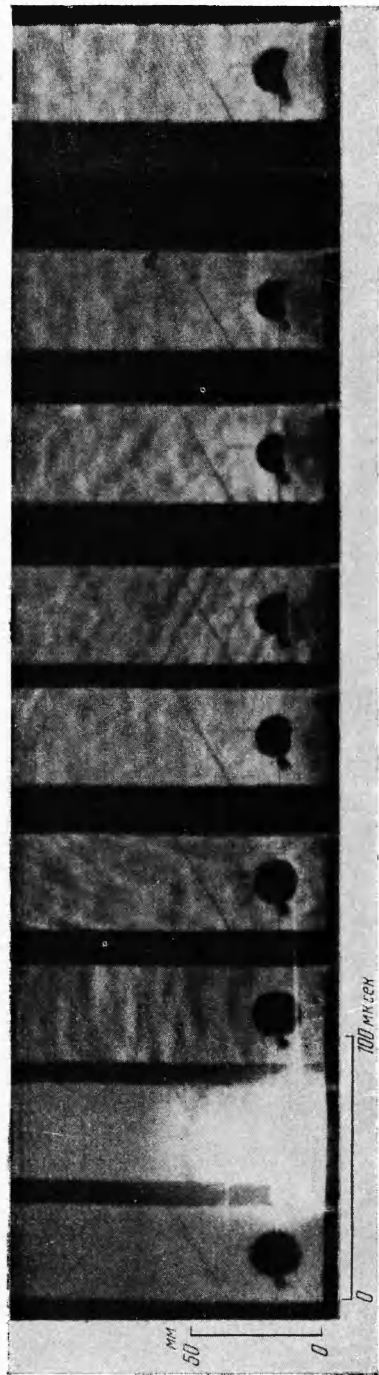
Для оценки отклонения от радиальной симметрии при сжатии будем учитывать начальные скорости, сообщаемые стенкам полости при отражении от них волны сжатия (фиг. 5). Величина этих скоростей мала по сравнению с максимальными скоростями движения стенки, однако их существование приводит к довольно значительной зависимости времени сжатия от угла α . Если пренебречь дифракцией волны на сфере, распределение начальных скоростей радиального движения стенки полости можно приближенно записать в виде

$$u = \frac{2\Delta p}{\rho c} \cos \alpha \quad (2)$$

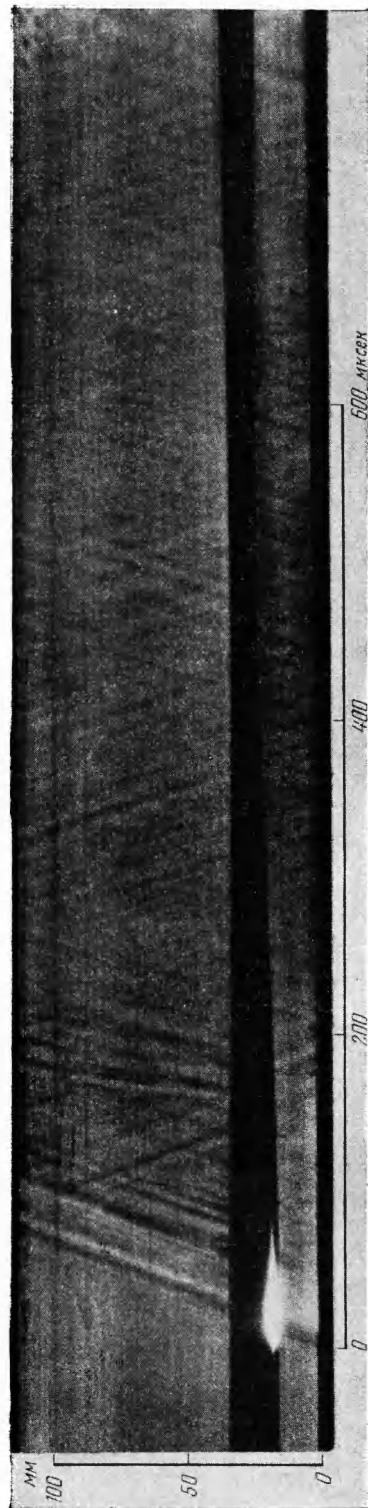


Фиг. 5

В целом для каждого из направлений, характеризуемых углом α , будем считать, что движение описывается уравнением (1). На основное движение наложим возмущение в виде малых начальных скоростей стенки, распределенных по α в соответствии с (2). Решая (1) для случая внезапного увеличения p_{∞} до постоянной величины, определяем зависимость



Фиг. 2

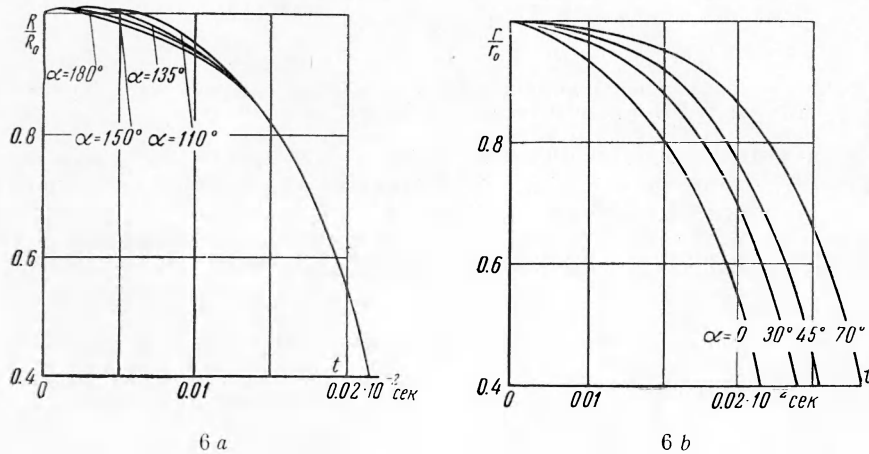


Фиг. 3

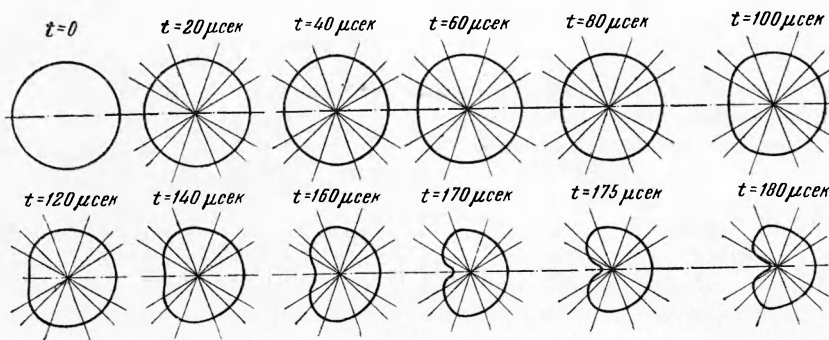
радиуса полости от времени для различных значений α путем графического интегрирования выражения

$$t = \int_{R_0}^R \frac{dR}{\sqrt{\frac{2p_0}{3\rho(\gamma-1)} \left[\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} \right] - \frac{2}{3} \frac{P_\infty}{\rho} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 \right] + \frac{2\Delta p \cos \alpha}{\rho c}}$$

Результаты расчета для $\Delta p = 20 \text{ атм}$ и $R_0 = 1 \text{ см}$ для задней и передней стенок показаны соответственно на фиг. 6 а и в. На фиг. 7 изображены



последовательные фазы деформации сферы для разных моментов сжатия, построенные на основании графиков фиг. 6. Несмотря на приближенный характер расчета и различие в форме ударной волны для расче-



Фиг. 7

та и опыта, контур деформации соответствует опытным данным (фиг. 2), т. е. рассмотренная выше схема расчета воспроизводит основные черты наблюдаемого явления. Решение задачи для p_∞ , изменяющегося во времени, связано с математическими трудностями.

Институт гидродинамики
СО АН СССР

Поступила 31 I 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Л а м б Г. Гидродинамика. Гостехиздат, 1947.
2. С о л о у х и н Р. И. О пульсациях пузырька газа в несжимаемой жидкости. Учен. совет по народнохозяйственному использованию взрыва. Изд-во СО АН СССР, 1961, вып. 18.