

Б. Е. ГЕЛЬФАНД, С. А. ГУБИН, С. М. КОГАРКО,
С. М. СИМАКОВ, Е. И. ТИМОФЕЕВ

РАЗРУШЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 15 VII 1974)

Распространение ударных волн в газожидкостных средах привлекает внимание в последние годы. Своеобразие таких сред состоит в том, что ударные волны в них распространяются со скоростями, много меньшими скорости ударных волн в газе и скорости звуковых волн в жидкости⁽¹⁻⁴⁾.

При описании структуры очень слабых квазиакустических волн давления на основе представления о сферически-симметричных колебаниях пузырьков удается получить удовлетворительное согласие теории с экспериментом^(1, 2). Однако при конечной интенсивности ударных волн, теория, основанная на представлении о сохранении пузырями газа сферической формы, приводит к существенному завышению длины релаксационной зоны за фронтом ударной волны. Действительно, если в эксперименте за волной еще заметные колебания давления сохраняются в течение промежутка времени $(1-3) \cdot 10^{-3}$ сек. при перепаде давления на фронте $\Delta P/P_0 = 3-4$, то по теории колебания продолжаются в течение 10^{-2} сек. и более. По-видимому, это связано с тем, что в теории не учитывались до сих пор столь существенные явления, как разрушение пузырей и несохранение ими сферической формы. Разрушение пузырей приводит к существенному изменению характерно-

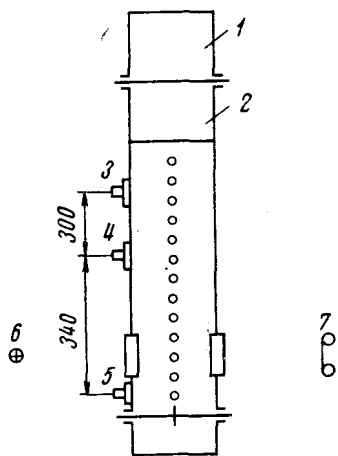


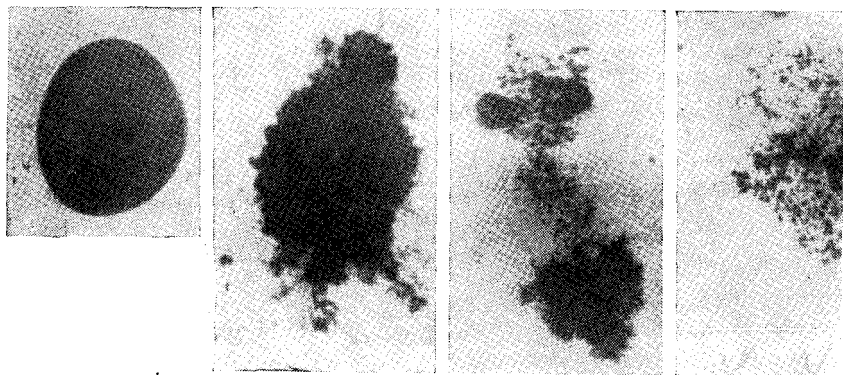
Рис. 1

го размера системы, к изменению характера теплообмена между жидкостью и газом и сдвигу характерных времен всех процессов в область высоких частот.

В литературе по взаимодействию пузырьков газа с ударными волнами до сих пор нет прямого свидетельства существования явления дробления пузырей. О нем скорее идет речь как о возможном, а не о реально существующем. Ближе всех к правильному ответу на вопрос о характере поведения воздушных пузырьков в ударных волнах подошел Нецименко, отметивший распад пузырей даже в слабых ударных волнах с перепадом давления на фронте $\Delta P/P_0 \approx 2$ при начальном давлении $P_0 = 1$ бар.

Для установления характеристик процесса разрушения пузырьков газа в жидкости под действием ударной волны разработана установка, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из вертикально стоящей гидродинамической ударной трубы с камерами высокого (1) и низкого (2) давления, разделенными разрывной мембраной. Камера низкого давления заливается жидкостью так, что между верхним уровнем жидкости и мембраной остается узкий промежуток для сброса излишнего

количества газа, поступающего через нижнее днище трубы в виде пузырьков известного размера. В стенках трубы заподлицо со внутренней поверхностью устанавливаются запускающий датчик давления (3) и датчики — регистраторы параметров волн давления (4, 5). Фотографирование пузырей с заданной задержкой за фронтом волны на неподвижную пленку производилось с помощью импульсной лампы ИСП-100-3, обеспечивающей вспышку света длительностью 20 мксек. Регулировка времени запаздывания импульса света за волной позволяет получить серию оди-



→ Рис. 2

ночных кадров, совокупность которых дает представление о поведении воздушного пузыря за фронтом ударной волны.

В процессе проведения экспериментов измерялась объемная концентрация газа в жидкости, давление на фронте ударной волны в газожидкостной среде и скорость ударной волны. Этих данных достаточно, чтобы определить скорость распространения слабых низкочастотных возмущений в смеси жидкости с пузырьками. Опыты проводились с ударными волнами с перепадом давления на фронте до $\Delta P/P_0 = 20$ при $P_0 = 1$ бар, с пузырьками размером от 10 до 0,5 мм при объемной концентрации газа в жидкости от 1 до 10%.

На рис. 2 представлена серия снимков пузыря размером $d_0 = 4$ мм, разрушающегося в волне с перепадом давления $\Delta P = 20$ бар при объемной концентрации 5%. Скорость распространения волны составляла 300 м/сек при скорости звука около 60 м/сек, направление волны показано на рисунке стрелкой.

Первая из фотографий показывает форму всплывающего воздушного пузырька до момента взаимодействия с волной, на следующих фотографиях — состояние того же пузыря в моменты времени $t = 210, 750$ и 860 мксек. соответственно за фронтом волны.

Как видно из фотографий, уже через $t = 210$ мксек. пузырь сплюсывается, так что его поперечный по отношению к направлению движения волны размер увеличивается почти вдвое. Поверхность пузыря искажена множеством неровностей, являющихся, по-видимому, следствием развития неустойчивости Рэля — Ламба — Тейлора из-за большого ускорения пузырька в волне давления. Дальнейшее развитие неустойчивости поверхности пузырька приводит к его распаду, уже заметному и при $t = 210$ мксек. При распаде образуется облако мельчайших пузырьков с размерами до $(10^{-2} - 10^{-1})$, где d_0 — начальный размер пузырька.

Превращение исходного пузырька в облако мельчайших пузырьков происходит в две стадии. Сначала пузырь разваливается на две большие части и некоторое количество мельчайших частиц ($t = 760$ мксек.), а затем большие части рассыпаются на отдельные пузырьки с размером $(10^{-2} -$

$10^{-1})d_0$. С уменьшением интенсивности волны число мельчайших пузырьков, образующихся при разрушении основного пузыря, сокращается, и, наконец, при давлении на фронте волны около (2–3) бар наблюдается лишь раздвоение исходных пузырей.

Из соображений размерности следует, что время дробления пузырей должно быть пропорционально величине

$$\tau \approx d\rho^{0,5}(\rho_f u_f^2)^{-0,5},$$

здесь ρ — плотность газа за волной, u_f — скорость движения жидкости за волной и ρ_f — плотность жидкости, практически совпадающая при малой объемной концентрации пузырей с плотностью двухфазной среды. В первом приближении скорость движения жидкости может быть найдена по соотношению

$$u_f = \Delta P(\rho D)^{-1},$$

что для описываемого случая дает величину $u_f \approx 6$ м/сек. Тогда $\tau \approx 10^{-1}$ сек. при изотермическом сжатии газа в пузыре. Полученное значение времени начала разрушения близко к экспериментальному значению $\tau \approx 2 \cdot 10^{-4}$ сек. Это свидетельствует о том, что основной силой, стремящейся разрушить пузырь, является движение жидкости за волной, а сопротивление разрушению оказывает сила инерции сжатого ударной волной газа.

Помимо основного факта, подтверждающего разрушение пузырьков, в работе было найдено критическое значение интенсивности волны, зависящее от размера пузырьков, при котором еще не происходит разрушения. Для пузырьков размером 4 мм критическое значение интенсивности волны соответствовало $\Delta P \approx 1$ бар. Если по найденной скорости движения жидкости за такой волной $u_f \approx 0,3$ м/сек рассчитать число Вебера, то окажется, что пузырьки газа не разрушаются при

$$We^* \leq \rho_f u_f^2 d_0 \sigma^{-1} \approx 5,$$

где σ — поверхностное натяжение.

Интересно отметить зависимость критической интенсивности волн давления от размера пузырька. Так, в волне с перепадом давления $\Delta P/P_0 \approx 3-4$ пузырьки размером 4 мм разрушались, а пузырьки размером 2 мм лишь незначительно деформировались. Указанное обстоятельство подтверждает возможность обнаружения единого критерия разрушения пузырьков, так как в диапазоне размеров $d_0 \approx 2-4$ мм $We^* = \text{const}$.

Выполненные исследования показывают, что уже при интенсивности волны, распространяющейся по газожидкостной среде, выше $\Delta P/P_0 \approx 1-2$ становится существенным разрушение пузырьков газа, которое необходимо учитывать при любых расчетах гидродинамики течения за волной.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
26 VI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ L. Noordji, Proc. IUTAM Symp. on Unsteady Flow of Water at High Speeds, 1973.
- ² Р. И. Нигматуллин, В. Ш. Шаганов, Н. С. Хабеев, ДАН, т. 214, № 4, 779 (1974).
- ³ Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин и др., ДАН, т. 213, № 5, 1043 (1973).
- ⁴ А. П. Бурдуков, В. В. Кузнецов и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 3, 65 (1973).