

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ СФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКОВЫМ ЭКРАНОМ

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

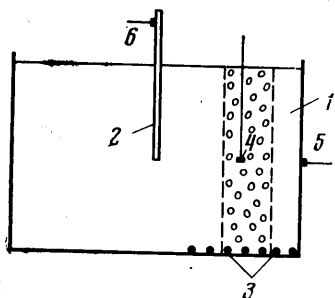
(Москва)

Особый интерес при изучении взрывных явлений в смесях жидкости с пузырьками газа вызывают исследования прохождения ударных волн через границу раздела в двухфазных системах [1-9], непосредственно связанных с решением ряда практических задач. Здесь можно упомянуть вопросы демпфирования ударного действия волн давления, возникающих при взрыве зарядов твердых или газообразных взрывчатых веществ в жидкости. Решение подобного рода вопросов типично для исследований по защите стенок бассейна от действия ударных волн при штамповке взрывом [4, 5]. Подобные задачи исследуются в работах по изучению взаимодействия мощных плоских волн давления с пузырьковыми экранами в ограниченных [4] и неограниченных [6] объемах жидкости.

Анализ результатов цитированных работ показывает, что условия преломления ударных волн на границах раздела до последнего времени остаются до конца невыясненными. Действительно, если в работах [4, 6] пузырьковые экраны считаются надежным средством ограждения стенок бассейна от ударных волн, то в [5] считается, что экран слабо влияет на параметры преломления волны. На основании расчетов [6] и экспериментов [3, 8] можно прийти к выводу о возможности усиления ударных волн, падающих на пузырьковый экран. Противоречивость представлений о взаимодействии волн давления с пузырьковыми экранами, по-видимому, порождена отсутствием контроля конкретных условий, в которых проводились опыты. Основное, на что не было обращено внимание в упомянутых исследованиях, это конфигурация падающей на экраны волны давления, геометрия самого экрана, а также взаимное расположение пузырькового экрана, преграды и источника возмущения. Воздействие пузырькового экрана на параметры волны существенно зависит от указанных параметров. При некоторых условиях, нахождение которых посвящены описанные ниже опыты, пузырьковые экраны действительно являются надежным способом поглощения ударных волн. На это указывают и некоторые прямые опыты [9].

1. Экспериментальная установка. Опыты по исследованию взаимодействия слабых сферических волн давления с пузырьковыми экранами проводились в бассейне с размерами $1.25 \times 1 \times 0.81$ м³. Схема установки представлена на фиг. 1. В бассейне 1 залита вода на высоту 0.8 м. В воду на глубине 0.4 м опускается излучатель волн давления 2. Излучатель представляет собой открытую с нижнего конца трубку с взрывчатой газовой смесью $C_2H_6 + 5O_2$, в которой осуществляется ее детонационное сгорание. При истечении продуктов детонации в воду формируется сферическая волна давления. Эта волна, распространяясь в воде, встречает на своем пути пузырьковый экран, создаваемый системой аэраторов 3. Регистрация параметров волн давления осуществляется датчиками 4 и 5. Датчик 4 перемещается вдоль оси бассейна на расстояние l от излучателя, а датчик 5 закреплен на стенке. Собственная частота датчиков близка к 30 кгц. Показания датчиков записывались на двухлучевой осциллограф ОК-24, запускавшийся сигналом от датчика давления 6, установленного на излучателе. Для создания экрана использовался воздух, расход которого измерялся газовым счетчиком типа ГКФ. По расходу воздуха и объему жидкости с пузырьками определяли объемную концентрацию газа β , которая в большинстве опытов составляла 1.5—2% при размерах пузырьков 2—4 мм. В процессе проведения опытов изменя-

ли расстояние от датчика давления 4 до излучателя и расстояние от пузырькового экрана до стенки бассейна. Расстояние l меняли в диапазоне от 0.15 до 0.35 м, а расстояние от экрана до стенки — в пределах 0—0.25 м. Толщина экрана ~ 0.06 —0.08 м. Интенсивность падающей на экран волны менялась в интервале $\Delta p = p_2 - p_1 = 1$ —4 бар. Здесь p_2 — давление на фронте ударной волны, а p_1 — давление в невозмущенной среде, 1 бар.



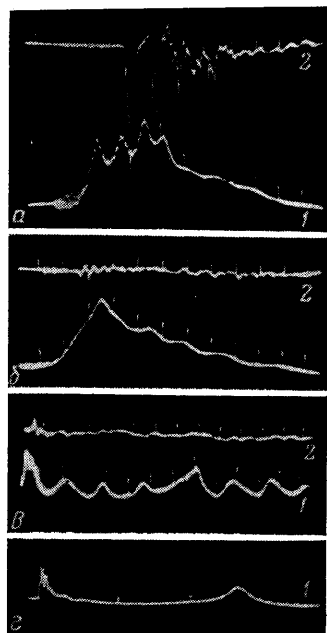
Фиг. 1

2. Основные результаты опытов. Взаимодействие волны давления с пузырьковым экраном, вплотную прилегающим к стенке. На фоторегистрации фиг. 2, а показаны записи давлений внутри экрана (датчик 4) и на стенке датчиком 5 (лучи 1 и 2 осциллографа). Метки времени на регистрации следуют через 200 мксек. Толщина пузырькового экрана 8 см, а интенсивность падающей на границу раздела сферической волны $p_2 = 2$ бар. На границе раздела вода — экран в соответствии с уменьшением акустического сопротивления среды происходит некоторое

ослабление исходной сферической волны. Датчик на стенке регистрирует интенсивные колебания давления. Вначале амплитуда колебаний достигает 5—7 бар, а затем через ~ 1 мсек колебания затухают. При этих же условиях опыта в отсутствие экрана амплитуда колебаний достигла 3 бар. Таким образом, в присутствии экрана, тесно прилегающего к стенке, не замечено ослабления возмущений, достигающих стенок бассейна. Этот результат согласуется с данными работы [8], в которой исследовался переход плоских ударных волн через границу раздела.

Взаимодействие волны давления с пузырьковым экраном, отделенным от стенки прослойкой воды. На фиг. 2, б приведена характерная для этого случая запись давления внутри экрана (луч 1 осциллографа) и на стенке (луч 2). Максимальное давление внутри экрана незначительно отличается от давления для случая, представленного на фиг. 2, а, и составляет $p_2 = 1.8$ бар. Метки времени следуют через 200 мксек. Однако на стенке регистрируются волны очень малой амплитуды. По сравнению со случаем непосредственно прилегающего к стенке экрана амплитуда колебаний уменьшилась почти в 10 раз. Следовательно, введение прослойки воды между экраном и стенкой способствует существенному ослаблению волны, приходящей на стенку.

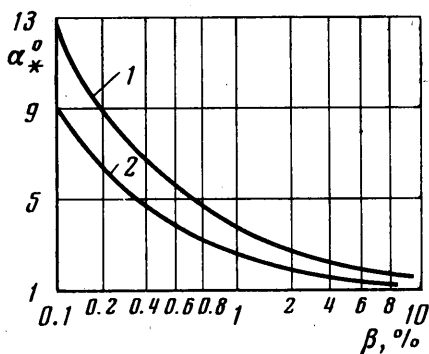
Интересно также отметить изменение общей картины колебаний давления в бассейне при наличии пузырькового экрана (фиг. 2, в). Датчик давления помещен внутри экрана, метки времени следуют через 2 мсек. Если в отсутствие экрана (фиг. 2, г) между двумя пульсациями давления через ~ 19 мсек давление менялось плавно (между метками времени 7 мсек), то внутри экрана от-



Фиг. 2

мечаются вторичные колебания. Это свидетельствует о движении волн давления по экрану.

3. Обсуждение результатов. Анализ проведенных опытов показывает, что в зависимости от расстояния пузырькового экрана от защищаемой стенки возможны все наблюдавшиеся в предшествующих работах варианты преломления ударных волн. По-видимому, при объяснении причин наблюдаемого явления недостаточно исходить только из анализа явления распада произвольного разрыва параметров, как в [6, 8]. При подобном подходе получается, что на границе раздела вода — двухфазная среда амплитуды волны падает, а на границе раздела двухфазная среда — вода —



Фиг. 3

возрастает, и роль экрана как ослабителя волн не будет выявлена. Подобный подход дает удовлетворительное согласие с тем, что действительно наблюдается, лишь для нормального падения плоских волн давления. Практически это осуществляется в одномерных условиях ударной трубы, а в случае сферических волн аналогичного поведения можно ожидать при больших расстояниях или при значительной толщине экрана, в котором волна станет практически плоской.

Если же радиус кривизны волны оказывается сравним с толщиной экрана, требуется дополнительный анализ преломления волны на обеих границах раздела вода — двухфазная среда. При этом наиболее существенную роль в ослабляющем действии пузырькового экрана должна играть задняя граница, разделяющая среду I с малой скоростью распространения возмущений ($c_1=100$ м/сек в случае объемной концентрации пузырьков $\beta=0.01$) от сплошной воды II, в которой скорость $c_2=1500$ м/сек. Известно, что при переходе волны в среду с большей скоростью звука в случае наклонного падения происходит полное внутреннее отражение [10], если угол падения α больше некоторого критического α_* . Определить критический угол для акустических волн можно по соотношению

$$\alpha_* = \arcsin \frac{c_1}{c_2} = \arcsin \sqrt{P_1 / \rho_1 \beta (1 - \beta) c_2^2}$$

Для слабых ударных волн необходимо учитывать зависимость скорости распространения D_1 от амплитуды волны $\alpha_* = \arcsin D_1 / D_2$, причем для слабых волн в воде $D_2 \approx c_2$.

На фиг. 3 представлена зависимость величины критического угла от объемной концентрации пузырьков β при двух значениях давления: $p_1=1$ бар — кривая 1, $p_1=0.5$ бар — кривая 2.

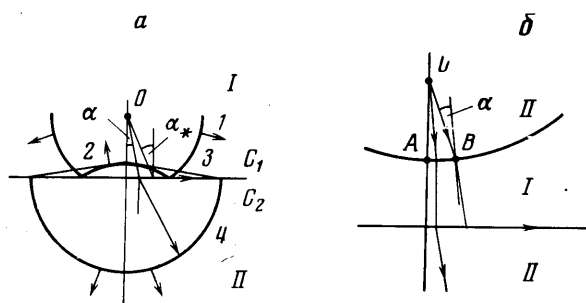
Из графика видно, что величины критических углов могут быть весьма малыми, поэтому незначительная кривизна волны, проходящей из двухфазной среды в воду, приводит к существенному ослаблению действия ударной волны.

Общая картина преломления сферической волны на границе раздела двухфазная среда (I) — вода (II) представлена на фиг. 4, а, где 1 — фронт падающей волны, 2 — фронт отраженной волны. В двухфазной среде в этом случае кроме падающей и отраженной волн возникает боко-

вая волна 3. Амплитуда преломленной волны 4 резко падает по мере удаления от границы раздела.

Выясним далее, каким образом может быть достигнута необходимая кривизна волны, падающей на заднюю границу экрана. Построение лучей методами геометрической акустики, как в [11], показывает, что полного внутреннего отражения при прохождении слоя двухфазной среды с плоскопараллельными границами получить нельзя, так как звуковые лучи выходят из экрана под углом, равным углу падения. Эффект достигается только в том случае, когда одна или обе границы вогнуты.

Рассмотрим случай вогнутости передней границы экрана, которая возникает в бассейне с водой за счет установившейся циркуляции жидкости



Фиг. 4

при подъеме воздушных пузырьков. Кривизна этой границы зависит от расхода воздуха и размеров бассейна.

Вторая причина, которая приводит к искривлению волны, падающей на заднюю границу раздела, заключается в том, что скорость распространения волны в двухфазной среде зависит от амплитуды. Так как амплитуда преломленной волны в точке A (фиг. 4, б, например) оказывается выше, чем в точке B , то скорость фронта в направлении нормали $O-A$ больше, то приводит к его дополнительному искривлению. Для слабых волн эта причина не столь существенна, но при увеличении амплитуды падающей волны влияние ее может стать заметным.

В результате выполненных исследований показано, что в зависимости от положения пузырькового экрана относительно жесткой стенки может наблюдаться как усиление, так и ослабление действия волны давления на преграду. Установлено, что демпфирование слабых ударных волн пузырьковым экраном существенным образом связано с явлением полного внутреннего отражения волн, пересекающих границу раздела двухфазная среда — сплошная жидкость, под углом, большим критического. Наибольшее демпфирование ударных волн наблюдается при размещении экрана вблизи источника возмущений.

Заслуживает специального рассмотрения вопрос о преломлении волн давления большей интенсивности на пузырьковых экранах. В этом случае существенным фактором ослабления волны может стать волна разрежения, появляющаяся при прохождении волны из воды в пузырьковый экран. Влияние волны разрежения во многом будет зависеть от длительности положительной фазы сжатия в падающей волне и от ее отношения к толщине пузырькового экрана. Можно предполагать, что при достаточной длине фазы сжатия влияние волны разрежения окажется не достаточным, чтобы демпфировать возмущения, проникающие в глубь экрана. Вопрос о

влиянии длины волны и толщины экрана на параметры преломления сильных ударных волн требует проведения дальнейших экспериментов.

Авторы благодарят А. А. Борисова за обсуждение результатов работы.

Поступила 28 IV 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Христофоров Б. Д. Экспериментальное изучение взаимодействия ударной волны в воде с жестким дном водоема. ПМТФ, 1960, № 4.
2. Христофоров Б. Д. Взаимодействие ударной волны в воде со свободной поверхностью. ПМТФ, 1961, № 1.
3. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко Б. С., Козарко С. М. Исследование волны сжатия в смеси жидкости с пузырьками газа. Докл. АН СССР, 1973, т. 213, № 5.
4. Райнхарт Д. С., Пирсон Д. Взрывная обработка металлов. М., «Мир», 1966.
5. Пихтовников Р. В., Хохлов Б. А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. Харьков, «Прапор», 1972.
6. Паркин Б. Р., Гилмор Ф. Р., Брод Г. Л. Ударные волны в воде с пузырьками воздуха. В сб. «Подводные и подземные взрывы». М., «Мир», 1974.
7. Jensen F. V. Response of an air bubble in water to a shock wave. Rept Dan. Center Appl. Math. and Mech., 1973, No. 49.
8. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко С. М., Тимофеев Е. И. Прохождение ударных волн через границу раздела в двухфазных газожидкостных средах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 6.
9. Hanasaki K., Ichiro I. Numerical analyses of the reduction of hydraulic pressure wave by the air curtain. J. Industr. Explos. Soc. Japan., 1972, vol. 33, No. 5.
10. Фридлиндер Ф. Звуковые импульсы. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
11. Friedrichs K. O., Keller J. V. Geometrical acoustics. 2. Diffraction, reflection and refraction of a weak spherical or cylindrical shock at a plane interface. J. Appl. Phys., 1955, vol. 26, No. 8.