

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОДЕ С ЖЕСТКИМ ДНОМ ВОДОЕМА

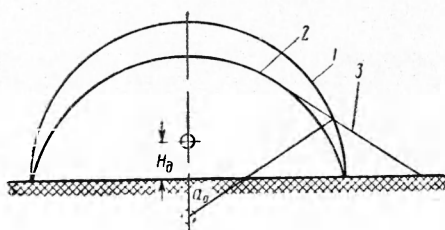
Б. Д. Христофоров

(Москва)

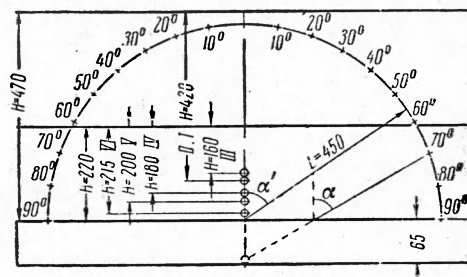
В настоящее время задача о взаимодействии ударной волны в воде с дном водоема решена лишь в линейном приближении [1, 2].

Однако производившиеся в последнее время исследования показали, что линейное приближение в этом случае недостаточно и дает существенное расхождение с опытом.

Волновая картина, имеющая место при взаимодействии ударной волны с дном для заданного расстояния  $L$  и положения заряда  $H_0$ , определяется соотношением скоростей продольных и поперечных волн в дне  $a, b$  и скорости звука  $c$  в воде.



Фиг. 1



Фиг. 2

Ниже рассматривается случай волновой картины  $b < c < a$ , представленный на фиг. 1, где 1 — падающая волна, 2 — отраженная волна, 3 — боковая волна.

В качестве модели дна была выбрана полистироловая плита с удельным весом  $a = 2200 \text{ м/сек}$ . Скорость продольных волн в полистироле меньше скорости звука в воде.

Задача допускает моделирование микрочарядами, если структурные неоднородности дна не влияют на процессы поглощения и дисперсии волн в нем.

В материалах типа полистирола подобные процессы нужно учитывать лишь при распространении волн с частотой свыше  $1 \text{ мГц}$ . Разложение профиля волны в интеграл Фурье показывает, что вклад высоких гармоник растет с понижением веса заряда, однако даже для зарядов весом  $\sim 10^{-4} \text{ кг}$  гармониками с частотой свыше  $1 \text{ мГц}$  можно пренебречь.

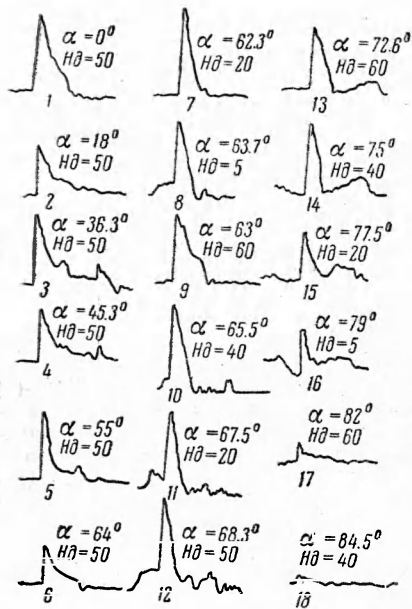
Параметры волн в воде при взрыве заряда на некоторой высоте над дном  $H_0$  на заданном расстоянии удобно рассматривать в зависимости от угла  $\alpha$  между вертикальной осью и прямой, проведенной из мнимого источника до какой-либо точки волны.

Как видно из фиг. 1, независимо от расстояния до места взрыва при углах  $\alpha < \alpha_0$  боковая волна не влияет на фронт падающей волны, а при углах  $\alpha > \alpha_0$  параметры последней определяются взаимодействием с отраженной и боковой волнами, потенциал которых  $\phi$  будет функцией [3] расстояния от мнимого источника и угла  $\alpha$ .

### 1. Условия проведения эксперимента.

Опыты проводились в стальном баке с водой размерами  $2 \times 1.5 \times 1 \text{ м}^3$ . Полистироловое дно имело размеры  $1.2 \times 0.45 \times 0.065 \text{ м}^3$ . Взрыв осуществляется прессованными сферическими зарядами из тена весом около  $1 \text{ г}$ .

Было проведено шесть опытов по измерению параметров волнового поля в воде, а также несколько опытов по измерению скорости продольных волн в полистироле.



Фиг. 3

Датчики устанавливались под различными углами к вертикальной оси по поверхности полусферы радиусом  $L = 450$  мм с центром в точке плиты под зарядом в диапазоне от 0 до  $90^\circ$ . Заряд взрывался на высотах  $H_0 = 5, 20, 40, 50, 60$  мм от дна. Схема размещения заряда и датчиков представлена на фиг. 2, где крестиками указано расположение датчиков, кружочками — зарядов.

Измерение параметров ударной волны производилось при помощи пьезоэлектрической аппаратуры.

Положение заряда и датчиков по глубине и расстоянию измерялось с точностью до 1 мм. Разброс показаний аппаратуры не превышал 10%.

2. Обсуждение опытных данных. Некоторые характерные осциллограммы приведены на фиг. 3 с указанием угла  $\alpha$  и высоты взрыва  $H_0$  над дном водоема.

По ним можно проследить формирование волнового поля в воде.

При углах  $\alpha < \alpha_0$  волновая картина состоит лишь из прямой и отраженной волн. При этом из-за недостаточной длительности электронной развертки приборов отраженная волна не видна на фиг. 3, 1, 2.

Начиная с угла  $\alpha = 63^\circ$ , перед прямой волной появляется боковая волна, которую в дальнейшем будем называть предвестником, фиг. 3, 8—18.

При  $\alpha = 68^\circ$  за прямой ударной волной появляется интенсивная волна сжатия (фиг. 3, 12—18), которую отделяет от прямой волны зона разрежения.

Взаимодействие волны разрежения с прямой приводит к сильному ослаблению последней.

Следует также отметить, что осциллограммы на фиг. 3, 1, 2, 9, искажены влиянием свободной поверхности воды.

Ниже мы отдельно рассмотрим компоненты волнового поля в воде: отраженную и прямую волну, а также предвестник.

а) *Отраженная от дна волна.* Недостаточная длительность электронной развертки приборов не давала возможности проследить отраженную волну при всех углах падения. Однако имеющиеся данные позволили построить на фиг. 4 зависимость коэффициента отражения  $k = p_0/p$  от угла падения  $\alpha$  (где  $p$  — давление в прямой волне,  $p_0$  — давление в отраженной волне), а также выявить некоторые особенности самой волны.

Из осциллограмм, приведенных на фиг. 3, 3—6, видно, что отраженная волна находится на эюре ударной волны. На конце отраженной волны возникает зона разрежения, которая, интенсивно взаимодействуя с прямой волной, придает ей параболическую форму.

Положение этой зоны разрежения определяет время действия ударной волны. Влияние свободной поверхности воды при этом исключено выбором глубины водоема. Поэтому волны понижения давления может отражать лишь само дно.

Положение максимума коэффициента отражения на фиг. 4 близко к углу полного внутреннего отражения  $\alpha = 43^\circ$ . Амплитуды отраженной волны значительно меньше рассчитанных по законам геометрической акустики. Это, видимо, объясняется ослаблением отраженной волны, вызванным ее взаимодействием с волнами разрежения, которые также излучает дно.

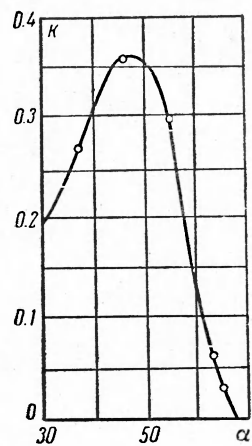
При дальнейшем увеличении  $\alpha$  коэффициент отражения уменьшается и становится равным нулю примерно при  $\alpha = 64^\circ$ .

После этого за прямой ударной волной появляется вновь волна сжатия, но перед ней идет волна разрежения, которая, взаимодействуя с ударной волной, искажает ее форму. С увеличением  $\alpha$  зона разрежения сжимается, а зона сжатия подходит все ближе к прямой волне.

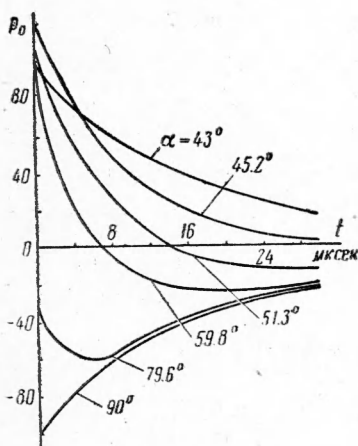
Положение зоны разрежения соответствует времени прихода отраженной от дна волны, максимум волны сжатия приходит значительно позже.

В диапазоне  $\alpha > 79^\circ$ , который можно назвать придонной зоной, обе волны составляют единый комплекс, из которого почти невозможно выделить прямую волну. При этом время волны представляет суммарное время действия прямой волны и волны сжатия и поэтому резко возрастает.

Для сравнения на фиг. 5 по методу Аронса и Йенни [2] построены эпюры давления  $p_0 = p_0(t)$  в отраженной волне для различных значений угла падения  $\alpha$ . Сравнение по-



Фиг. 4



Фиг. 5

казывает удовлетворительное качественное согласие между теорией и экспериментом в области углов  $\alpha < 64^\circ$ , однако появление волны сжатия с волной разрежения в начале при  $\alpha > 64^\circ$  этой теорией не объясняется, тут, видимо, надо учитывать нелинейные эффекты.

б) *Предвестник*. Боковая волна, которую условились называть предвестником, впервые появляется на осциллограммах при угле  $\alpha_0$ , который определяется точкой пересечения боковой волны с прямой в плоскости фиг. 1. При этом давление в прямой волне резко возрастает.

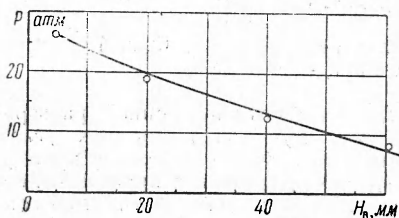
Величина угла  $\alpha_0$  на каждом расстоянии определяется высотой взрыва  $H_\partial$ , как это следует из формулы (2.1), и стремится к углу полного внутреннего отражения при  $H_\partial = 0$ ,

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{1/2x \sin 2\alpha_1 (1 + \sqrt{L^2/x^2 \sin^2 \alpha_1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha_1})}{2H_\partial + x \cos^2 \alpha_1 - x \sin^2 \alpha_1 \sqrt{L^2/x^2 \sin^2 \alpha_1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha_1}} \quad (2.1)$$

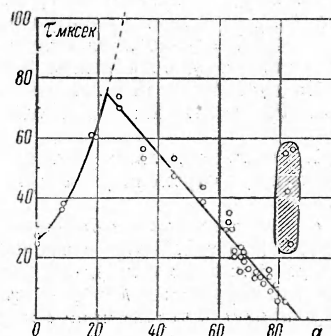
$$x = \frac{L}{\cos \alpha_0} - 2H_\partial, \quad \alpha_1 = \arcsin \frac{c}{a} = 43^\circ$$

На фиг. 6 приведен график зависимости максимального давления  $p$  (в атм) в предвестнике вблизи  $\alpha_0$  от высоты взрыва  $H_\partial$  (в мм) над плитой. При уменьшении  $H_\partial$  от 60 до 5 мм давление в предвестнике возрастает примерно в четыре раза и достигает 25—30% от величины расчетного давления во фронте ударной волны.

Ввиду недостаточной длительности электронной развертки приборов начало предвестника наблюдается лишь в диапазоне углов  $62^\circ < \alpha < 70^\circ$ . Форма эпюры при этом для малых  $H_\partial$  характеризуется резким скачком давления вначале.



Фиг. 6



Фиг. 7

В придонной зоне, где давление во фронте ударной волны сильно ослаблено отраженными от дна волнами разрежения, роль предвестника значительно возрастает. Его импульс и давление в этой области сравнимы с теми же параметрами ударной волны.

В качестве характеристик прямой ударной волны рассмотрим ее время действия и давление во фронте.

в) *Время действия прямой ударной волны*. На фиг. 7 построен график зависимости времени действия прямой волны  $\tau = \tau(\alpha)$  от угла падения на дно водоема  $\alpha$ .

С увеличением  $\alpha$  растет заглубление датчиков. При этом время действия должно возрастать согласно пунктирной кривой на фиг. 7, построенной по акустической теории. Однако лишь значения времени  $\tau$  при малых углах  $\alpha$ , где датчики находятся вблизи свободной поверхности воды, совпадают с ней.

Достигнув максимального значения при  $\alpha = 25^\circ$ , время действия ударной волны в дальнейшем начинает уменьшаться с ростом  $\alpha$  вплоть до угла  $\alpha \sim 80^\circ$ . При дальнейшем увеличении  $\alpha$  в придонной зоне время действия  $\tau$  резко возрастает. Положение максимума на кривой  $\tau = \tau(\alpha)$  определяется в основном глубиной водоема и высотой взрыва. При уменьшении глубины точка максимума будет сдвигаться в сторону больших углов потому, что волны разрежения от свободной поверхности будут приходить в место измерения раньше волны разрежения от дна.

Возникновение отраженных от дна волн понижения давления объясняется тем, что при увеличении угла падения нормальная к границе раздела составляющая скорости воды уменьшается и обращается в нуль при  $\alpha = 90^\circ$ .

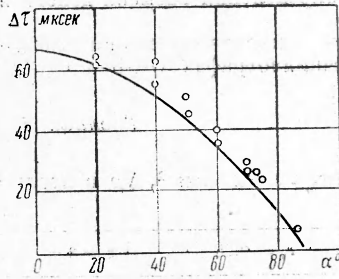
Однако на поверхности раздела даже в этом случае будет действовать давление ударной волны, которое вызовет смещение границы вниз, а это, в свою очередь, приведет к образованию волны разрежения в воде.

Значение угла падения, при котором происходит смена знака отраженной волны, зависит от акустических характеристик сред и давления в падающей волне.

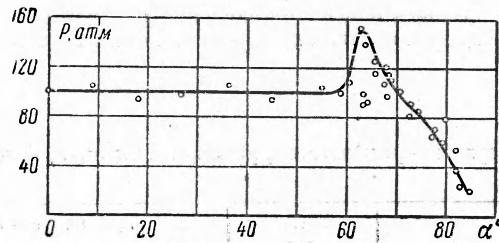
Увеличение значений времени действия  $\tau$  в придонной зоне объясняется тем, что здесь ударную волну невозможно отделить от вплотную к ней примыкающих волн сжатия, см. фиг. 3, 16—18.

На фиг. 8 приведен график зависимости времени  $\Delta t$  между фронтом прямой и вершиной отраженной волн от угла падения  $\alpha$ , рассчитанный по акустической теории при  $H_0 = 50$  мм.

На той же фигуре нанесены времена действия ударной волны, полученные экспериментально. Как видно из фиг. 8, там, где отсутствует влияние свободной поверхности воды, время действия ударной волны изменяется в зависимости от  $\alpha$  так же, как время прихода отраженной волны. Это подтверждает тот факт, что волна разрежения возникает при отражении ударной волны от дна водоема.



Фиг. 8



Фиг. 9

г) Давление во фронте прямой ударной волны. При обработке опытных осциллограмм истинное давление  $p$  во фронте ударной волны определялось продолжением ее эпюры до момента, равного половине времени завала фронта.

После этого величины давлений приводились к одному расстоянию  $L = 450$  мм по формуле (2.2) [4]

$$p = \frac{21\,500}{(L/R^\circ)^{1.2}} \text{ ат.м} \quad (2.2)$$

где  $R^\circ$  — радиус заряда.

На фиг. 9 значения  $p$ , полученные во всех опытах, нанесены на график в зависимости от  $\alpha$ .

В диапазоне изменения  $\alpha$  от 0 до угла  $\alpha_0$ , соответствующего точке пересечения боковой и прямой волн, давление во фронте последней постоянно. В пределах  $\alpha_0$ , ввиду взаимодействия ударной волны с предвестником,  $p$  резко возрастает. При этом на кривой  $p = p(\alpha)$  имеется резкий максимум.

В диапазоне  $\alpha > \alpha_0$  давление во фронте прямой волны с увеличением  $\alpha$  резко падает до значений, в несколько раз меньших расчетного, благодаря нелинейному взаимодействию с волнами понижения давления, отраженными от дна.

При углах  $\alpha \sim 90^\circ$  фронт прямой волны почти полностью разрушается волнами разрежения.

Следует отметить, что резкий максимум может наблюдаться лишь при малых значениях высоты взрыва  $H_0$ , когда величина давления в предвестнике, как это следует из фиг. 6, того же порядка, что и давление ударной волны.

Разрушение дна не позволило подробно исследовать  $p$  при  $\alpha \sim \alpha_0$  в зависимости от высоты взрыва  $H_0$ . Однако характер процесса из полученных данных достаточно ясен.

Поступила 10 IV 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркова К. И., Шемякин Е. И. Распространение нестационарных возмущений в слое жидкости, находящемся в контакте с упругим полупространством. ПММ, 1957, т. XXI, вып. 1.
2. Аронс А. и Йенни Д. Изменение формы звукового импульса при полном внутреннем отражении. Сб. Распространение звука в океане. ИИЛ, 1951.
3. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Изд-во АН СССР, 1957.
4. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов из ТЭН малого веса. ПМТФ, 1960, № 2.