

ОЗ; 12

© 1991

РАСЩЕПЛЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН  
В ВОДЕ ПРИ ИХ ВСТРЕЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИМ. В а з е л л и, Г. В. Д р е й д е н,  
И. В. К р а с о в с к а я, Ю. И. О с т р о в с к и й,  
В. П а л л е с к и, И. В. С е м е н о в а

Настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия двух встречных сферических ударных волн в воде.

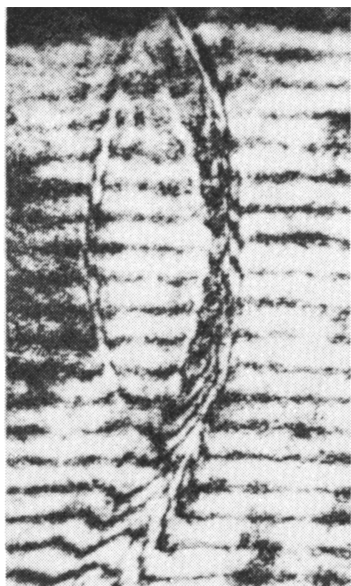
Ударные волны возбуждались в кювете с водой при воздействии нефокусированного излучения импульсного рубинового лазера ОГМ-20 ( $\varepsilon = 0.4$  Дж,  $\tau = 15-20$  нс) на две одинаковые полупрозрачные алюминированные пленки, расположенные одна за другой. Плотность мощности падающего как на первую, так и на вторую пленку излучения превышала порог взрывного испарения материала, однако количества поглощенной в первой и второй пленке энергии различались, что приводило к существенной разнице интенсивностей и скоростей возбуждаемых волн. Фронты волн имели форму, близкую к сферической, поскольку сечение падающего на пленки пучка было много меньше, чем расстояния от них до зоны регистрации.

Регистрация процесса производилась с помощью установки для получения двухэкспозиционных голограмм с использованием в качестве источника света второго импульсного рубинового лазера ОГМ-20, синхронизированного с первым. С одной и той же голограммы восстанавливались как голографическая интерферограмма, так и шпирен-фотография исследуемых волн.

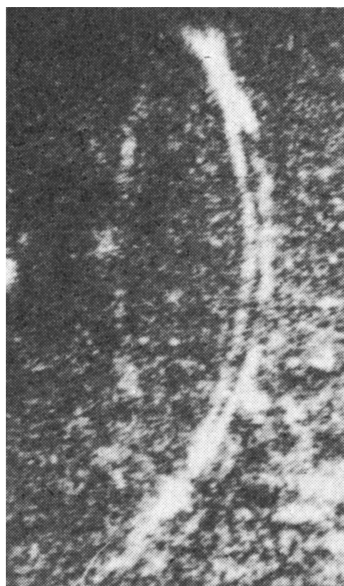
На рис. 1, а, б приведены голографическая интерферограмма и соответствующая шпирен-фотография взаимодействующих волн. Слева направо распространяется более сильная (и быстрая) волна, и в той ее части, которая уже прошла сквозь встречную, более слабую волну, наблюдается расщепление фронта волны на шпирен-фотографии и, соответственно, двойные максимумы на интерферограмме.

В случае одиночной волны (полученной в тех же условиях, но при отсутствии второй алюминированной пленки, или той же волны до момента встречи в другой) ни шпирен-фотография, ни интерферограмма подобных особенностей не имеют (рис. 2, а, б). Расщепление волн не наблюдается также и в том случае, когда интенсивности (и скорости) встречных волн одинаковы.

В работе [1] приведены результаты исследований ударной волны, образующейся при воздействии лазерного излучения на погруженную в воду металлизированную пленку. В частности, опре-

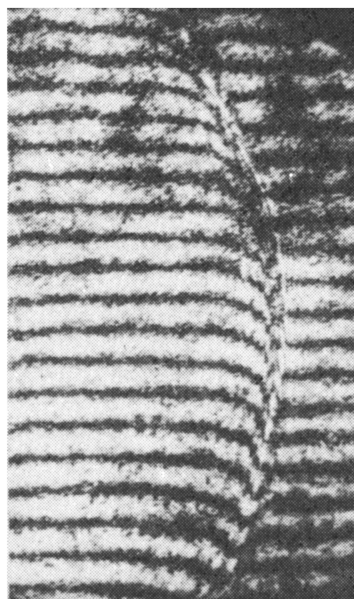


$\alpha$



$\delta$

Рис. 1.



$\alpha$



$\delta$

Рис. 2.

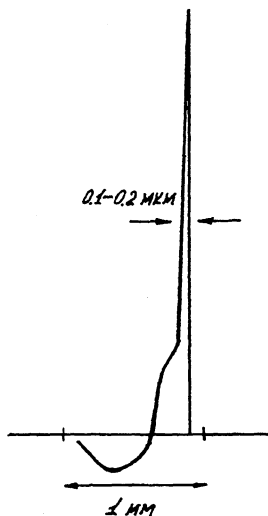


Рис. 3.

делены параметры такой ударной волны — скорость, давление на фронте, толщина сжатого слоя. По результатам этих исследований можно построить следующий профиль импульса давления ударной волны такого типа (рис. 3). Как видно из рисунка, волна состоит из очень узкой ( $\sim 0.1-0.2$  мкм) зоны сжатия, за которой следует протяженная, имеющая малую амплитуду, зона разрежения.

Основываясь на этих исследованиях, мы попытались объяснить наблюдаемые эффекты (рис. 1), рассматривая процесс столкновения встречных ударных волн как взаимодействие каждой из этих волн с движущимися навстречу тонким сферическим слоем сжатой жидкости, соответствующим другой ударной волне. При таком взаимодействии должны наблюдаться как прошедшие, так и отраженные волны, параметры которых были определены нами из оптических представлений.

Оптика акустических и слабых ударных волн во многом аналогична световой оптике. Коэффициенты отражения и пропускания на границе раздела сред могут быть рассчитаны по формулам, аналогичным формулам Френеля [2], а форма волнового фронта после отражения или преломления на границе раздела может быть построена по принципу Гюйгенса (с учетом изменения скорости волны после отражения).

Параметры волн до и после взаимодействия были определены нами следующим образом.

Скорости волн до соударения были рассчитаны по двухэкспозиционным шпирен-фотографиям, полученным с помощью оптической линии задержки по методике, описанной в [1]. Они оказались

следующими: для сильной волны -  $U = 1700$  м/с; для слабой волны -  $U = 1460$  м/с.

В книге [3] приведены соотношения, связывающие скорость ( $N$ ) распространения ударной волны в жидкости с давлением ( $P_\Phi$ ), плотностью ( $\rho_\Phi$ ) и скоростью звука ( $a_\Phi$ ) на ее фронте:

$$\rho_\Phi = \frac{1}{m} \rho_0 N(N - a_0), \quad (1)$$

$$\rho_\Phi = \frac{1}{1 - \frac{1}{m}(1 - a_0/N)}, \quad (2)$$

$$a_\Phi = a_0 \left(1 + \frac{n-1}{2Bn} \rho_\Phi\right), \quad (3)$$

где  $\rho_0$  и  $a_0$  - плотность невозмущенной жидкости и скорость звука в ней (для воды  $a_0 = 1450$  м/с);  $m$  - полуэмпирический коэффициент, равный для воды 2.1;  $B$ ,  $n$  - постоянные, входящие в уравнение состояния воды в форме Тэта, значения которых:  $B = 3045$  кг/см<sup>2</sup> (атм),  $n = 7.15$ .

Подставляя в формулы (1)-(3) измеренные значения скоростей волн, получим следующие значения параметров: для сильной волны:  $P_{\Phi u} = 2024$  атм,  $\rho_{\Phi u} = 1.075 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $a_{\Phi u} = 1864$  м/с; для слабой волны:  $P_{\Phi v} = 69$  атм,  $\rho_{\Phi v} = 1.003 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $a_{\Phi v} = 1464$  м/с.

Коэффициенты отражения и пропускания волн по давлению были рассчитаны по формулам Френеля (справедливым в акустическом приближении) для случая нормального падения на границу раздела сред с такими параметрами. Тогда для случая отражения слабой волны на фронте сильной:  $K_{отр\Phi} = 0.16$ ;  $K_{пр\Phi} = 0.84$ . При отражении сильной волны на фронте слабой:  $K_{отр\Phi} = 0.0064$ ;  $K_{пр\Phi} = 0.9936$ .

Необходимо однако учесть, что толщина зоны сжатия ( $\sim 0.1-0.2$  мкм) много меньше эффективной длины волны, соответствующей ударной волне. Тогда при падении встречной ударной волны на такой тонкий сжатый слой будет происходить ее отражение как от передней, так и от задней его границы, причем обе эти отраженные волны будут синфазны и, интерферируя между собой, дадут волну с удвоенной амплитудой. Коэффициент отражения по давлению в этом случае будет в два раза больше, чем рассчитанный по формуле Френеля.

По определенным давлениям на фронтах отраженных и прошедших волн рассчитаем их скорости, используя формулу (1). Получим:  $U_{отр} = 1454$  м/с;  $U_{пр} = 1697$  м/с;  $U_{отр}^* = 1453$  м/с;  $U_{пр}^* = 1457$  м/с.

Построим результирующие фронты волн, используя принцип Гюйгенса и полученные значения скоростей волн. Построение показывает (рис. 4), что в нашем случае должны наблюдаться 4 волны: сильная волна  $\vec{U}$ , движущаяся слева направо, преобразует-



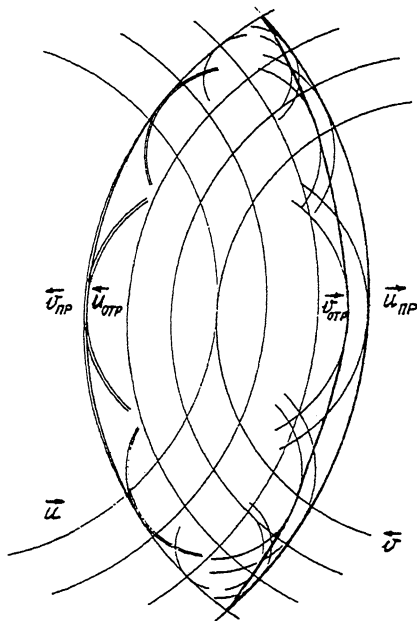


Рис. 4.

ся в волну  $\vec{u}_{\text{пр}}$  (прошедшую сквозь встречную слабую волну  $\vec{v}$ ) и волну  $\vec{u}_{\text{отр}}$  (отраженную от нее); в свою очередь волна  $\vec{v}$  преобразуется соответственно в  $\vec{v}_{\text{пр}}$  и  $\vec{v}_{\text{отр}}$ .

Таким образом, в результате взаимодействия в каждую сторону должны двигаться по две волны, имеющие разные скорости. Причем разница скоростей волн  $\vec{u}_{\text{пр}}$  и  $\vec{v}_{\text{отр}}$  на два порядка больше, чем  $\vec{v}_{\text{пр}}$  и  $\vec{u}_{\text{отр}}$ . Расстояние между фронтами этих волн определяется разницей их скоростей и интервалом времени, прошедшим от момента встречи волн до момента регистрации.

Величина расщепления волн  $\vec{u}_{\text{пр}}$  и  $\vec{v}_{\text{отр}}$  ( $\sim 0.6$  мм, см. рис. 1) хорошо согласуется с зарегистрированной разницей скоростей соответствующих волн. Величина ожидаемого расщепления волн  $\vec{v}_{\text{пр}}$  и  $\vec{u}_{\text{отр}}$  в нашем случае много меньше и находится за пределами пространственно-временного разрешения нашей установки.

Таким образом, в рамках сделанных предположений наблюдаемое расщепление ударных волн может быть объяснено.

С другой стороны, это наблюдаемое явление можно рассматривать с гидродинамической точки зрения как результат взаимодействия двух волн с сугубо неоднородными распределениями параметров за их фронтами. Схематически ударную волну в жидкости (рис. 3) можно трактовать как состоящую из ударного фронта, имеющего бесконечно малую толщину, волны разрежения и волны сжатия. В процессе прохождения двух таких волн друг сквозь друга возникают многократные пересечения названных гидродина-

мических разрывов друг с другом, в ходе которых возможно образование вторичного возмущения, создающего систему из двух несбливающихся, следующих в одном направлении ударных фронтов.

Авторы предполагают поставить численный эксперимент по проверке указанной гипотезы.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Harith M.A., Pallesechi V., Salnetti A., Singh D.P., Vaselli M., Dreiden G.V., Ostrovsky Yu.I., Semenova I.V.// J. Appl. Phys. 1989. V. 66 (11). P. 5194-5197.
- [2] Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред. М.: Наука, 1982. 335 с.
- [3] Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л.: Судпромгид, 1961. 313 с.

Физико-технический  
институт им А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
28 июня 1991 г.

Институт атомной  
и молекулярной физики,  
Пиза, Италия