

03:07:08

©1994

УДАРНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ В ЖИДКОСТИ. КИНЕТИКА ВЫНУЖДЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ УДАРНЫХ ВОЛН

В.С.Тесленко

Известно, что при фокусировке мощного лазерного излучения в твердые и жидкие среды наблюдается "оптический пробой", который сопровождается эффектами вынужденного рассеяния (ВРМБ, ВКР, ВТР), разрушением твердых тел и кавитацией жидкости [1-5]. Аналогичные эффекты разрушения твердых сред и кавитация жидкости наблюдаются при фокусировке коротких ультразвуковых и ударно-акустических пучков в конденсированные среды [6-10].

Качественное сходство наблюдаемых эффектов разрушений в твердых телах и кавитации в жидкости при фокусировке мощного оптического и акустического излучений указывает на возможность привлечения аналоговых моделей при изучении воздействия мощных световых и акустических импульсов на среду. Примером оптоакустических аналоговых постановок являются задачи о самовоздействии сильных звуковых пучков и ударно-акустических волн с различными модельными средами [11-12]. В рассмотренных теоретических работах отмечен недостаток экспериментальных материалов для правильного построения моделей взаимодействия ударно-акустических полей с реальными средами.

На рис. 1 представлена схема экспериментов и волновой картины перед фокусом F . В экспериментах использовался электромагнитный генератор ударно-акустических волн в виде полого шарового сегмента с радиусом кривизны 170 мм, с апертурой 220 мм [9,10]. Генератор ударно-акустических волн (1) устанавливался на дне кюветы (2) размером 300 × 300 × 480 мм. Фоторегистрация гидродинамических процессов, происходящих при фокусировке ударных волн, осуществлялась на Теплеровской установке камерой СФР. Регистрация импульсов давления производилась на осциллографе С-8-14 с помощью игольчатых пьезоэлектрических датчиков с пространственным разрешением 0.4-0.6 мм и временным разрешением 0.04-0.1 мкс.

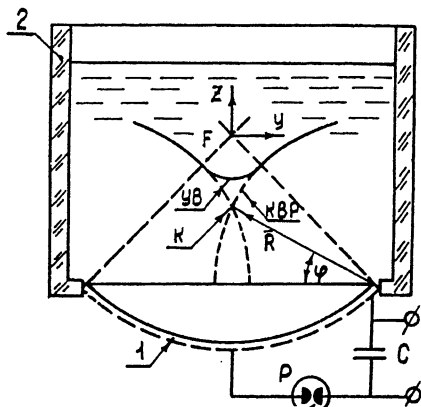


Рис. 1. Схема экспериментов и волновой картины перед фокусом F : 1 — электромагнитный генератор ударно-акустических волн, 2 — кювета, УВ — фокусируемая ударно-акустическая волна, КВР — краевая волна разрежения, К — скользящая вдоль оси Z точка аксиальной фокусировки КВР, \vec{R} — радиус-вектор КВР.

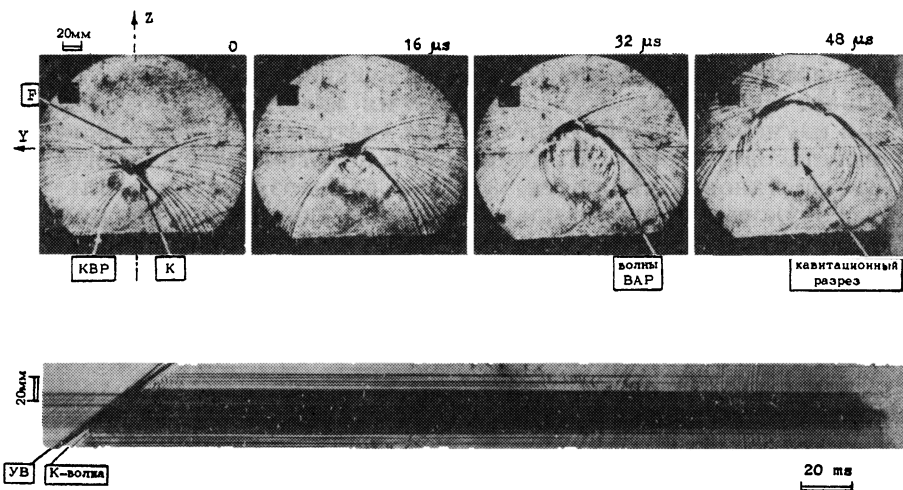


Рис. 2. а — кинограмма гидродинамических процессов в фокальной области, б — фоторегистрограмма ударно-акустического пробоя для сечения вдоль оси Z . Обозначения соответствуют обозначениям рис. 1.

На рис. 2, а представлены отдельные кадры теневой кинограммы гидродинамических процессов, происходящих в зоне фокуса при фокусировке волн сжатия (УВ) и краевых

вых волн разрежения (КВР). Обозначения на рис. 2 соответствуют обозначениям рис. 1. На схеме волновой картины рис. 1 и на кинограмме рис. 2, *a* начало отмеченных координат Y, Z соответствует геометрическому фокусу F фокусируемой УВ. В экспериментах геометрический фокус и нулевые значения координат Y, Z фиксируются точкой максимальных значений давления для слабых ударно-акустических волн (~ 1 МПа). Горизонтальная линия на кадрах соответствует сечению геометрического фокуса и совпадает с координатной осью Y .

На представленной кинограмме отслеживается процесс формирования волн вынужденного акустического рассеяния (ВАР) и зоны кавитации в фокальной области. В целом этот процесс мы будем называть ударно-акустическим пробоем (УАП), так как общая картина гидродинамических процессов при УАП и при лазерном пробое жидкости совпадают [2,4,5,9]. В дальнейшем эти два физических эффекта будут сравниваться.

Волны ВАР на данной и подобных кинограммах представляют собой сложное волновое поле, состоящее из дискретных сферических волн, излучаемых движущимся источником. Таким источником является K -волна, которая представляет собой фокальную точку K (рис. 1), а в эксперименте фокальную область K (рис. 2, *a*), которая является пересечением торроидальной поверхности КВР на оси Z . K -волна движется вдоль оси Z с фазовой скоростью U . С такой же скоростью движется фронт зоны кавитации вдоль оси Z . Фронт зоны кавитации совпадает с фронтом излучения волн ВАР. Скорость K -волны для данной системы легко находится из соотношения $U = a / \cos(\theta/2)$ (где a — скорость звука в воде, $\theta/2$ — угол между нормалью КВР и осью Z в точке K , $\theta/2 = \pi/2 - \varphi$), или $U = a / \sin \varphi$. В нашем случае кавитационный процесс реализуется в интервале углов $\varphi = 45^\circ - 55^\circ$, что соответствует интервалу скоростей $U = 2.1 - 1.8$ мм/мкс. Для четкого выявления этого факта осуществлялась щелевая непрерывная фоторегистрация пробоя вдоль оси Z . На рис. 2, *b* представлена одна из фоторегистрограмм. По угловым характеристикам регистрируемых волн видно, что скорость K -волны превышает скорость УВ ($v = a = 1.5$ мм/мкс). На фоторегистрограммах хорошо отслеживаются моменты образования волн ВАР и кавитационных пузырьков при прохождении K -волны через фокальную область F . Затем отслеживаются процессы пульсаций пузырьков и излучаемые волны при захлопывании пузырьков. Периоды первой и второй пульсаций пузырьков T_1, T_2 зависят от давления в УВ $P_1(Z, Y)$ величины разрежения $P_2(Z, Y)$ и свойств жид-

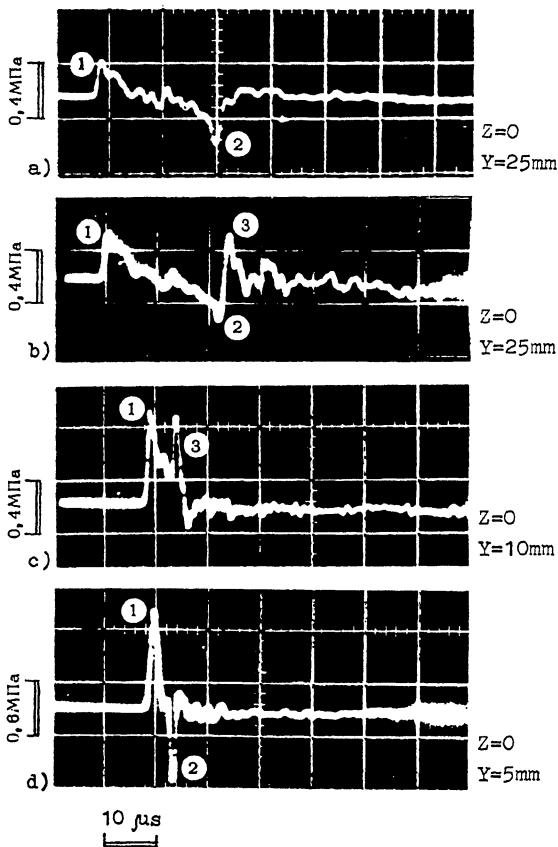


Рис. 3. Осциллограммы эпюры давлений в заданных координатных точках (Z, Y): a, d — без пробоя; b, c — с пробоем; 1 — импульс волны сжатия (УВ); 2 — импульс волны разрежения (КВР); 3 — импульс от ударно-акустического пробоя.

кости. Так для технической воды без твердых частиц в фокусе при $P_1(0,0) \cong 15 - 25$ МПа: $T_1 \cong 130 - 320$ мкс. При наличии в фокусе твердых частиц с сечением больше фокального пятна при тех же исходных параметрах: $T_1 \cong 200 - 400$ мкс. По данным экспериментов: $T_2/T_1 = 0.4 - 0.5$, $\eta_2/\eta_1 = 0.06 - 0.16$, (η_1, η_2 — энергия первой и второй пульсаций пузырька). Из расчетов по математическим моделям подобного процесса [13] следует: $\eta_2/\eta_1 = 0.01 - 0.02$. (Для лазерного пробоя воды: $\eta_2/\eta_1 = 0.01 - 0.07$ [4]).

На рис. 3 представлены осциллограммы $P(t)$ для выбранных координатных точек по Z, Y . Вблизи координатных то-

чек $-Z = 0 - 15$ мм, $Y = 25$ мм (рис. 3, *a*, *b*) реализуется возможность регистрировать в развязке по времени волны сжатия (1) — УВ, волны разрежения (2) — КВР, и излучаемые из фокальной области волны вынужденного акустического рассеяния (3) — ВАР. Идентификация принадлежности импульсов отслеживается по данным координат и параметрам времени между импульсами (1), (2), (3): t_{12} , t_{23} , t_{13} . Осциллограммы рис. 3, *a*, *d* соответствуют случаям отсутствия пробоя жидкости. Измерения поля давлений вдоль оси Z показали, что при отсутствии пробоя жидкости наблюдается закономерность:

$$|P_2|/|P_1| \simeq 1,$$

где $P_{1\max}$ давление в УВ (1) $P_{2\max}$ давление в волне разрежения (2). Для технической воды это условие выполняется до давлений в фокусе $P_1(0,0) = 4 - 6$ МПа. Дальнейшее повышение давления в фокальной области приводит к условию: $|P_2|/|P_1| \rightarrow 0$, за счет уменьшения абсолютных значений P_2 . Однако условие (1) при пробое в фокусе сохраняется в дальней зоне перед фокусом. Уменьшение P_2 в фокальной области коррелирует с появлением и последующим увеличением интенсивности ВАР. Осциллограммы рис. 3, *b*, *c* соответствуют случаям, когда наблюдается пробой жидкости. Причем осциллограмма рис. 3, *b* соответствует параметрам $P_1(0,0)$, близким к порогу пробоя и в переходной зоне для волн ВАР. При перемещении датчика к оси наблюдается амплитудное сложение дискретных импульсов волн ВАР (3) в комбинации с импульсами (1), (2) (осц. рис. 3, *c*). Амплитуда импульса (3) вблизи фокуса становится соизмерима с импульсом (1).

Из анализа кино-фоторегистрограмм и осциллограмм давления следует, что источником волн ВАР являются расширяющиеся кавитационные пузырьки в следе K -волны, которые формируют сложную структуру волнового поля. В интервале углов $\theta/2 \div \pi$ наблюдается рассеяние волн ВАР. А в интервале углов $0 \div \theta/2$ за счет сверхзвукового движения источника (K -волны) обеспечиваются условия сложения дискретных волн ВАР (рис. 3, *c*). В результате в переменном телесном угле θ из дискретных волн ВАР формируется волновая картина типа "присоединенной ударной волны" или ударной волны от взрыва. Наблюдаемый процесс имеет качественное сходство со сверхзвуковым движением заостренного тела в атмосфере, или взрывом шнурового заряда ВВ, имеющего скорость "детонации" $U = a/\cos(\theta/2)$.

Итак, при фокусировке УВ в жидкость в фокальной области происходит взрыв-пробой, который возникает в резуль-

тате велинейного поглощения энергии фокусируемой УВ. Наблюдаемый УАП отличается от лазерного пробоя более медленным поглощением и преобразованием энергии. УАП происходит, так же как и лазерный пробой, в результате поглощения энергии (в данном случае энергии УВ) на взвешенных частичках, пузырьках и микропузырьках. Механизмы поглощения и выделения энергии для УАП разделены временным интервалом (τ_{12}), определенным как время между приходом УВ и КВР в заданную точку.

УАП, так же как и лазерный пробой, сопровождается излучением волн ВАР, которые в своей суперпозиции могут формировать волны ВАР в виде УВ.

При УАП, так же как при взрыве ВВ и лазерном пробое, в фокусе образуется пульсирующая каверна, которая образуется в результате слияния более мелких пузырьков.

Автор приносит свою благодарность В.А.Майеру и А.Н.Кудряшову за помощь в проведении экспериментов и В.В.Митрофанову, Ю.В.Андрянову за полезные обсуждения работы.

Список литературы

- [1] Реди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
- [2] Аскарьян Г.А., Прозоров А.М., Чантурия Г.Ф., Шипуло Г.П. // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. В. 6. С. 2180-2181.
- [3] Лазерное разрушение и рассеяние света в твердых прозрачных диэлектриках // Труды ФИАН. 1978. Т. 101. 150 с.
- [4] Тесленко В.С. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 8. С. 1732-1737.
- [5] Teslenko V.S. IEEE Transaction on Electrical Insulation 1991. V. 26. N 6. P. 1195-1200.
- [6] Бергман Л. Ультразвук. ИЛ: М., 1957. 726 с.
- [7] Титов В.М. Журнал ПМТФ. 1976. V. 4. С. 127-130.
- [8] Muller M. // Acoustica. 1987. V. 64. P. 85-93.
- [9] Андрянов Ю.В., Ли А.А., Тесленко В.С. // Вопросы курортологии физиотерапии и лечебной физической культуры. 1992. Т. 4. С. 42-48; 1993. Т. 3. С. 54-61.
- [10] Райтенбергер Х. // ТИИЭР. 1988. Т. 76. N 9. С. 194-205.
- [11] Бункин Ф.В., Крацов Ю.А., Ляхов Г.А. // УФН. 1986. Т. 149. В. 3. С. 391-411.
- [12] Руденко О.В., Сапожников О.А. // Вестник Московского университета. 1991. Т. 32. № 1. Серия 3. С. 3-17.
- [13] Charies C. // Journal of the Acoustical Society of America. 1989. V. 86 (1). P. 215-227.

Поступило в Редакцию
4 декабря 1993 г.