

ВТОРИЧНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ КАВИТАЦИИ

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Россия, 630090 Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 15
Тел.: (3832)333047; Факс: (3832)331612
E-mail: sankin@hydro.nsc.ru

²Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen
Bürgerstraße 42-44, 37073 Göttingen, Germany

Экспериментально исследована динамика кавитационных процессов методами высоко-скоростной киносъемки, измерения поля давлений и свечения при фокусировке биполярной ударно-акустической волны. Обнаружены и исследованы вторичные акустические волны от локально возбуждаемых зон кавитации в объеме жидкости и вблизи свободной поверхности. Обсуждается роль вторичных акустических волн в механизме свечения жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика пузырьков играет ключевую роль в механизмах взаимодействия ударных волн (УВ) со средой при литотрипсии. При схлопывании пузырька возможна, например, генерация ударных волн, амплитуда которых может превосходить амплитуду давления в первоначальной волне [1]. Высокие температуры и градиент скорости жидкости известны как дополнительные механизмы воздействия УВ [2].

Были сделаны многочисленные попытки вычисления давления в жидкости в сходящихся акустических импульсах [3] и от коллапсирующего пузырька [4]. Так как за время короткого акустического импульса можно пренебречь диффузией газа в пузырьке и считать давление внутри пузырька незначительным [5], из модели Гилмора-Акуличева вытекает возможность появления волны разгрузки [6]. Так как пузырьки с различными радиусами расширяются до определенного размера за примерно одинаковое время, данное граничное условие приводит к скачкообразной релаксации давления в волне к нулевому значению. При определенных условиях данный импульс преобразуется в импульс сжатия, что и обнаруживается в экспериментах от локально возбуждаемых зон кавитации [7].

Рассматриваемый механизм существенно изменяет картину распространения сходящихся или отраженных волн с амплитудой, превышающей кавитационный порог. В работе представлены результаты по получению вторичных кавитационных волн (ВКВ) и наблюдению корреляции с интенсивностью свечения жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Использовался генератор ударных волн с апертурой $D = 70$ мм и фокусным расстоянием $F = 55$ мм. Излучатель, работающий по принципу [8], содержал электромагнитную катушку и металлическую мембрану, разделенные диэлектрической пленкой. Катушка состояла из 11 витков, уложенных треком из 5 проводников в одинарный слой. Низкоиндуктивная емкость $C = 1$ мкФ и 2 мкФ разряжалась через катушку, создавая мощный импульс тока. Магнитное поле катушки не проникает через мембрану из-за скин-эффекта и, следовательно, толкает мембрану в жидкость. Давление в начальном акустическом импульсе контролировалось напряжением на конденсаторе U_r от 5 до 10 кВ. Акустический импульс, генерируемый в жидкости, имеет длительность фронта 0.5 мкс для емкости $C = 2$ мкФ. Распространяясь к фокусу, акустический импульс преобразуется в ударную волну.

Излучатель установлен на дно капролоновой кюветы. Кювета имеет два стеклянных окна для проведения киносъемки и наблюдения свечения в жидкости.

Давление измерялось оптико-волоконным зондом (FOPH 300, [9]). Для наблюдения распространения ударных волн и динамики пузырьков использована высокоскоростная камера (IMACON 468, Hadland, 8 фреймов, время экспозиции 10 нс). Подходящее увеличение до 3 мкм на пиксел достигнуто оптическими объективами (Nikon). Наблюдение светоразбрасывания велось с помощью ФЭУ (Hamamatsu R5600U-06, спектральный диапазон 260-530 нм, временное разрешение 5.8 нс). Для измерения пространственного распределения излучения применена фокусирующая система с квадратной диафрагмой (длина стороны 1.2 мм) и 50 мм объектив (Nikon). Таким образом достигнута минимальная ошибка синхронизации между волной и вспышками света, равная 0.9 мкс. Сигналы записаны цифровым осциллографом (TDS 784A, Tektronix, аналоговый вход 1 ГГц).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Давление. На рис.1 представлена общая картина явления кавитации. В этом эксперименте поверхность жидкости находилась в фокальной плоскости генератора. Начальный импульс производит первое кавитационное облако (4) вытянутое вдоль оси (сигароподобно), его центр расположен на 10 мм ниже фокуса. Отражаясь от свободной поверхности, волна создает кавитацию непосредственно под свободной поверхностью в виде туманоподобного облака (6), состоящего из мелких пузырьков, имеющего форму шапки (возможно полый внутри). Дно шапки окружено туманоподобным кольцом пузырей (5).

В процессе распространения и отражения ударной волны, вызывающей кавитацию, наблюдалось существенное изменение формы импульса. Обнаружены вторичные акустические волны (2) и (3), расходящиеся от кавитационных облаков. Источник волн, выявленный как пересечение нормалей к ВКВ, находится внутри кавитационных облаков, что подтверждает кавитационную модель генерации ВКВ. Измеренное расстояние между первичной и вторичной волнами равно 3.8 мм и пересчитано во временной масштаб 2.6 мкс, используя скорость звука. Следовательно, интервалы между пиками давления и вспышками света ожидаются равными.

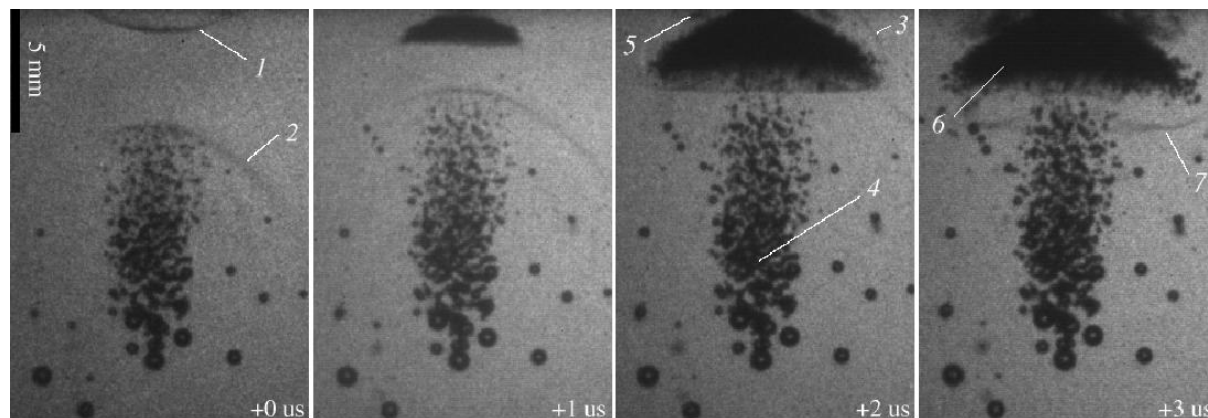


Рис.1. Индуцированная ударной волной кавитация в воде вблизи свободной поверхности для $U_e = 9$ кВ. Цифровые обозначения расшифрованы в тексте.

На рисунке 2 представлена детальная картина давления вблизи двух описанных кавитационных облаков (кластеров). Для облака, удаленного от границ жидкости, ВКВ регистрировались для $U_e = 9$ кВ и $C = 2$ мкФ, для которых имеет место развитая кавитация. Позиции датчика (а), (b), (c) и (d) показаны на рис. 2,А. Второй видимый фронт (2) соответствует положительному градиенту давления. При определенных условиях эта часть волны трансформируется в ударный фронт и становится видимой данным методом наблюдения.

Важно отметить, что перед ВКВ почти нет видимых пузырьков. Полости, суммарный объем которых возрастает в 300 раз при изменении напряжения от 5 до 10 кВ, сосредоточены за ВКВ и рассматриваются как причина искажения волновой картины. Пик давления, соответствующий ВКВ, находится в минимуме давления первоначальной волны и имеет длительность меньшую, чем полуволна разрежения. Следовательно, краевая волна разрежения продолжается за пиком ВКВ, что находится в противоречии с известным теоретическим расчетом без кавитации [3].

Газо- и паронаполненные полости можно различить по скорости распространения и временам стабильного существования. Так, например, видимая скорость дна облака (6) примерно в два раза превышает скорость звука из-за геометрического эффекта. При этом центры тяжести пузырьков существенно не сдвигаются, в то время как волны уходят за пределы видимости (рис.2,В).

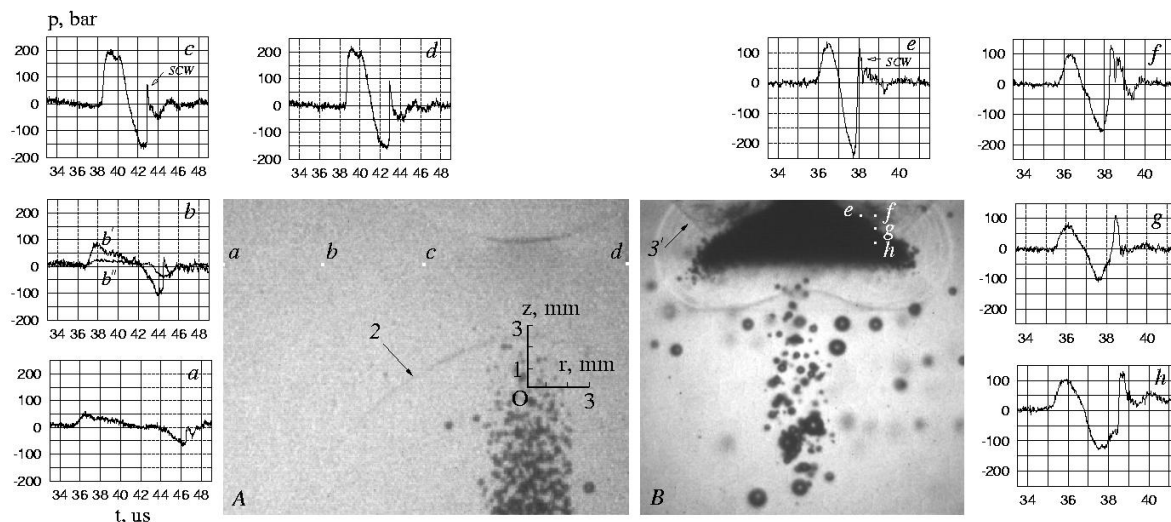


Рис.2. Давление в воде и положения датчика в аксиальной системе координат (r, z) с началом в фокусе и расстояниями в мм. А: фокус в точке О, $C = 2$ мкФ, $U_z = 9$ кВ, $t = 40$ мкс; осциллограммы для $C = 2$ мкФ, $U_z = 9$ кВ (b'' – $C = 2$ мкФ, $U_z = 5$ кВ) для положений датчика $a = (-15, 6)$, $b = (-10, 6)$, $c = (-5, 6)$, $d = (5, 6)$. В: фокус в центре верхнего края, $C = 2$ мкФ, $U_z = 7$ кВ, $t = 39$ мкс, осциллограммы для $C = 1$ мкФ, $U_z = 6$ кВ для положений датчика $e = (2, -0.5)$, $f = (2.5, -0.5)$, $g = (2.5, -1)$, $h = (2.5, -1.5)$.

Осциллограммы (е), (f), (g), (h) получены для $U_r = 6$ кВ и $C = 1$ мкФ (позиции датчика показанны на рис. 2,В). Данные параметры генератора недостаточны для генерации ВКВ в объеме воды, что позволяет исключить регистрацию волн (2) вблизи свободной поверхности. Измерения выявили первоначальный импульс сжатия и следующий за ним импульс разрежения, видимо состоящий из полуволны разрежения в суперпозиции с отраженной инвертированной полуволной сжатия первоначальной волны. Кавитация в мощном импульсе разрежения генерирует ВКВ и в этом случае. Эта волна, отражаясь от свободной поверхности, интерферирует сама с собой на оси симметрии. Из осциллограм стало ясно, что импульс сжатия распространяется от точки (е) к точке (f) и от точки (f) к точке (h) под углом 65 ± 5 градусов к свободной поверхности. Данная волна может соответствовать отраженной волне 3' на рис.2,В.

Свечение. Несмотря на то, что наблюдение отдельных пузырьков в туманоподобном облаке было затруднено, возможно исследовать динамику пузырьков посредством регистрации люминесценции облака.

На рис.3 представлена гистограмма свечения облака (6), накопленная для 16 выстрелов генератора. Генератор работал в режиме 'быстрых' выстрелов с частотой повторения 0.16 Гц. Свечение наблюдалось как три группы вспышек. Величины амплитуд давления и вспышек показаны в таблице 1. Временной интервал между первой и второй группами равен 1.7 ± 0.4 мкс, что близко к половине временного интервала между первоначальным (1) и вторичным (2) импульсами давления, которые

могут быть отнесены к первой и второй группам вспышек соответственно. Данные в таблице 1 для амплитуд вспышек и давления скоррелированы, что указывает на возможность адиабатической модели свечения.

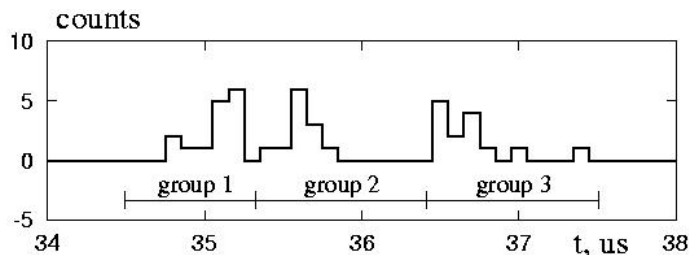


Рис.3. Гистограмма сигналов люминесценции для 16 выстрелов $U_z = 8$ кВ в 10% растворе глицерина. Центр области наблюдения находился при $z = -0.6$ мм.

Таблица 1. Амплитуды давления и вспышек света.

U_z , кВ	p_1^+ , атм $z = 0$ $r = 0$	p_1^- , атм $z = 0$ $r = 0$	p_2^+ , атм $z = 3$ мм $r = 5$ мм	Люминесценция $z = -0.6$ мм, $r = 0$		
				Группа 1	группа 2	группа 3
5	650±50	-180±30	0±5	1	9	1
6	700±50	-200±30	10±5	8	18	4
7	750±50	-330±30	40±5	8	13	8
8	750±50	-390±30	60±5	15	12	14
9	750±50	-420±30	80±5	-	-	-

Возможной причиной для второй группы вспышек в предположении адиабатической модели свечения может оказаться отраженная волна (3') (отмечена на рис.2е как SCW). Детальная динамика жидкости в облаке (6) в условиях быстрораспространяющейся кавитации все еще остается неясной.

Работа выполнена при поддержке Немецкой службы академических обменов (DAAD грант Nr. A/00/01480), и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты Nr. 01-02-06444 и Nr. 00-02-17992).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Lindau O. and Lauterborn W., in: Nonlinear acoustics at the turn of the millennium. ISNA-15. Eds: W.Lauterborn, T.Kurz, AIP Conference Proceedings, 2000, v524, pp.385-388.
2. Crum L.A. Sonoluminescence, sonochemistry, and sonophysics. J. Acoust. Soc. Am., 1994, v95, N1, pp.559-562.
3. Coleman A.J., Choi M.J., and Saunders J.E. Theoretical prediction of the acoustic pressure generated by a shock wave lithotripter. Ultrasound in Medicine and Biology, 1991, v17, N3, pp.245-255.
4. Akulichev V.A., Boguslavskii Yu.Ya., Ioffe A.I., Naugol'nykh K.A. Radiation of finite-amplitude spherical waves. Soviet physics - Acoustics, 1968, v13, N3, pp.281-285.
5. Church C.C. A theoretical study of cavitation generated by an extracorporeal shock wave lithotripter. J. Acoust. Soc. Am., 1989, v86, N1, pp.215-227.
6. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва. Журнал прикладной механики и технической физики, 1987, N.4, с.23-48.
7. Тесленко В.С. Ударно-акустический пробой в жидкости. Кинетика вынужденного акустического рассеяния при фокусировке ударных волн. Письма в журнал технической физики, 1994, т.20, N.5, с.51-56.
8. Eisenmenger W. Elektromagnetische Erzeugung von ebenen Druckstößen in Flüssigkeiten. Acustica, 1962, v12, pp.185-202 (in German).
9. Staudenraus J. and Eisenmenger W. Fibre-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock wave measurement in water. Ultrasonics, 1993, v31, pp.267-273.