

СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 662.215.4 + 662.217.7:66.084

СВЕЧЕНИЕ В ВОДЕ И ГЛИЦЕРИНЕ
В ПОЛЕ СФЕРИЧЕСКИ ФОКУСИРУЕМЫХ
И ПЛОСКИХ УДАРНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В. С. Тесленко, Г. Н. Санкин, А. П. Дрожжин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Совместно исследована динамика генерации свечения и развития кавитации в поле сферически фокусируемых и плоских ударно-акустических волн в воде, глицерине и их смесях. Показано, что первый импульс свечения при сферической фокусировке ударно-акустических волн коррелирует с кавитационным разрывом жидкости. Предполагается, что регистрируемое свечение обусловлено электрокинетическими процессами при образовании и росте кавитационных пузырьков.

В последнее десятилетие в зарубежных научных и популярных изданиях растет число публикаций, относящихся к проблемам сонолюминесценции при сферической фокусировке стационарных акустических волн в жидкости [1, 2]. Интерес к сонолюминесценции жидкости связан с тем, что проведенные спектральные исследования и гидродинамические расчеты показали возможность достижения температур плазмы внутри пузырька $\approx 10^7$ К [3, 4]. Однако, как отмечается в обзоре [5], наблюдаемое свечение при кавитации в периодическом акустическом поле может возникать не только за счет коллапса пузырьков, но и быть обусловленным сопутствующими электрокинетическими процессами при дроблении пузырьков.

В работе [6] было показано, что при фокусировке в жидкости коротких ударно-акустических волн (УАВ) в фокальной области возникает развитый кавитационный процесс, который сопровождается сонолюминесценцией.

В данной работе проведено более детальное исследование световых вспышек при развитии кавитационных процессов в поле сферически фокусируемых и плоских ударно-акустических волн. Для выявления природы сонолюминесценции выполнено комплексное исследование свечения и кавитационных процессов методами скоростной киносъемки и измерения давления для импульсных источников УАВ в воде, глицерине и их растворах. Генерация и фокусировка УАВ проводилась по методике, описанной в [7].

В работе использованы электромагнитные генераторы УАВ: 1) с излучающей поверхностью в форме сегмента сферы с апертурой $D_1 = 55$ мм, с фокусным расстоянием $F = 55$ мм; 2) плоский излучатель с апертурой $D_2 = 70$ мм. Размер кюветы $106 \times 106 \times 130$ мм. УАВ имели биполярный профиль — волна сжатия с длительностью $\tau_+ \approx 2$ мкс и волна разрежения с $\tau_- \approx 2$ мкс по полувысоте. Давление контролировалось датчиком давления с разрешением по времени 0,05 мкс и по пространству 0,7 мм. Эксперименты проводили в интервале давлений $p_+ = 2 \div 6$ МПа для плоской и $p_+ = 2 \div 40$ МПа для сферически фокусируемой УАВ ($p_-/p_+ = 0,3 \div 1$). Свечение регистрировалось с помощью ФЭУ-35 (спектральный диапазон чувствительности $\lambda = 300 \div 600$ нм). Кинетика кавитационных процессов в фокальной области регистрировалась теневым методом на скоростной фоторегистратор в режиме щелевой и покадровой разверток. В экспериментах использовались двухлучевые осциллографы С8-14, С9-27.

На рис. 1,а представлена фоторегистрограмма взаимодействия биполярной УАВ с дистиллированной водой. Щель фоторегистратора располагалась вдоль оси фокусировки. Точка фокуса находилась в объеме жидкости. На фоторегистрограмме отслеживаются процессы кавитационного разрыва жидкости в волне разрежения (1); детальная динамика кавитационных пузырьков, коалесценция пузырьков, волны, отраженные от стенок кюветы и сво-

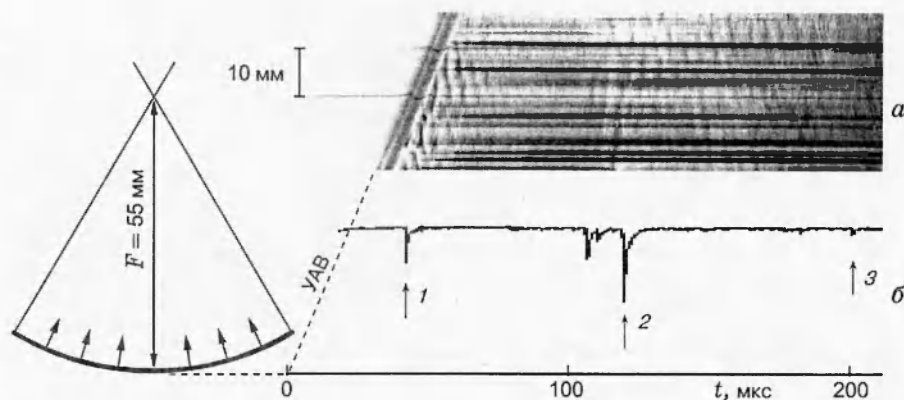


Рис. 1. Фоторегистрограмма (а) и осциллограмма световых соновспышек (б) в едином масштабе времени для случая сферической фокусировки ударно-акустической волны в объеме воды

бодной поверхности (2); вторичные волны от схлопывающихся пузырьков в интервале (2–3). На рис. 1, б в том же масштабе времени, что и для рис. 1, а, и для равных условий экспериментов представлена осциллограмма световых вспышек, регистрируемых из всего объема кюветы. В отмеченных промежутках времени (1–3) наблюдаются световые вспышки.

Для выявления «принадлежности» световых вспышек 1, 2 наблюдаемым гидродинамическим процессам были выполнены две серии экспериментов.

1. Для подтверждения того, что свечение 1 соответствует моментам растяжения и разрыва жидкости в волне разрежения, были поставлены эксперименты по фокусировке сферических УАВ вблизи свободной поверхности жидкости. Такая постановка выбрана потому, что из предварительных результатов экспериментов следовало, что при фокусировке УАВ на свободную поверхность амплитуда свечения 1 (см. рис. 3) увеличивается на порядок по сравнению с результатами фокусировки в объеме жидкости (см. рис. 1) при одних и тех же параметрах УАВ. Это связано с увеличением зоны кавитации за счет усиления волны разрежения вблизи свободной поверхности при отражении [8].

На рис. 2 показаны кадры кинограммы гидродинамических процессов, которые развиваются при фокусировке УАВ вблизи свободной поверхности воды. На рис. 3, а представлена фоторегистрограмма такого же процесса (щель вдоль оси фокусировки). Соответствующая осциллограмма световых вспышек дана

на рис. 3, б, также в едином масштабе времени, при тех же параметрах УАВ, что и для рис. 1.

В этой серии экспериментов регистрация свечения совмещалась с измерением давления в фокусе УАВ на глубине $0,5 \div 1$ мм. Пространственная область эмиссии светового излучения выбиралась с помощью специальной системы линз с диафрагмой. Эмиссия излучения регистрировалась из области диаметром 5 мм, прилегающей к датчику давления. На рис. 4 представлены осциллограммы одновременной регистрации давления в фокусе, измеренного датчиком, погруженным на глубину 1 мм (а), и свечения из фокальной зоны (б) при сферической фокусировке УАВ на свободную поверхность 10 %-го раствора глицерина в воде.

Аналогичные результаты наблюдались в чистой воде и глицерине. Отметим, что при замене воды глицерином амплитуда свечения в промежутках времени 1, 2 возрастает почти в 40 раз при прочих равных параметрах эксперимента.

Из результатов этой серии экспериментов следует, что начало свечения жидкости в поле УАВ коррелирует с фазой волны разрежения и процессом кавитационного разрыва жидкости (см. рис. 3, 4).

2. Для подтверждения того, что свечение на временном промежутке 2 (см. рис. 1, 3) соответствует моментам прохождения акустических волн, отраженных от стенок кюветы, через зону кавитационных пузырьков, были выполнены эксперименты по прохождению плоской УАВ через зону кавитации в дистиллированной воде. Под углом 90° к фокусируе-

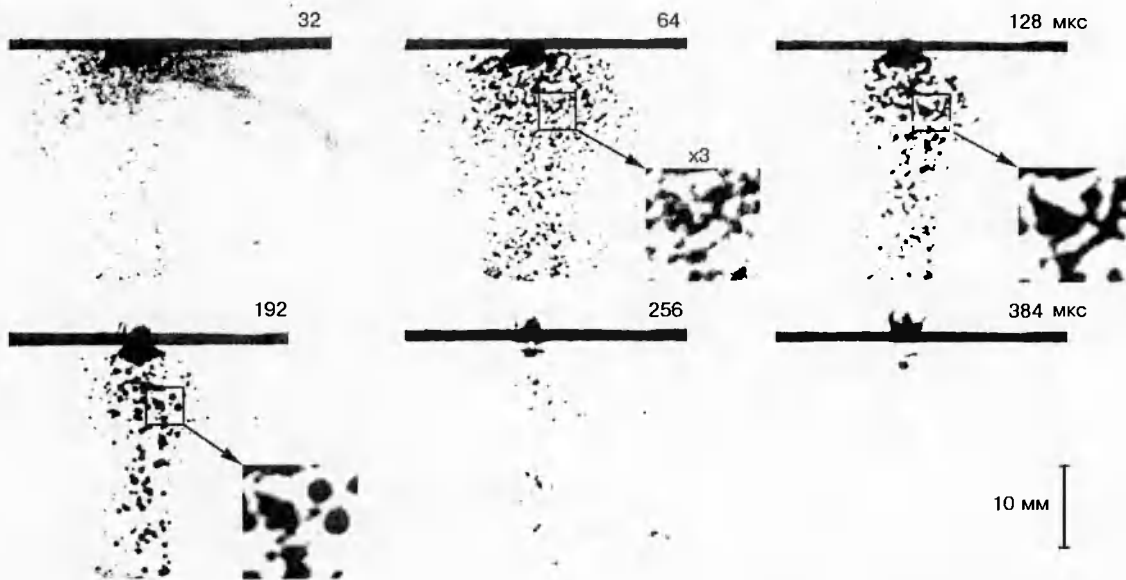


Рис. 2. Общая картина кавитационных процессов при сферической фокусировке ударно-акустической волны вблизи свободной поверхности воды

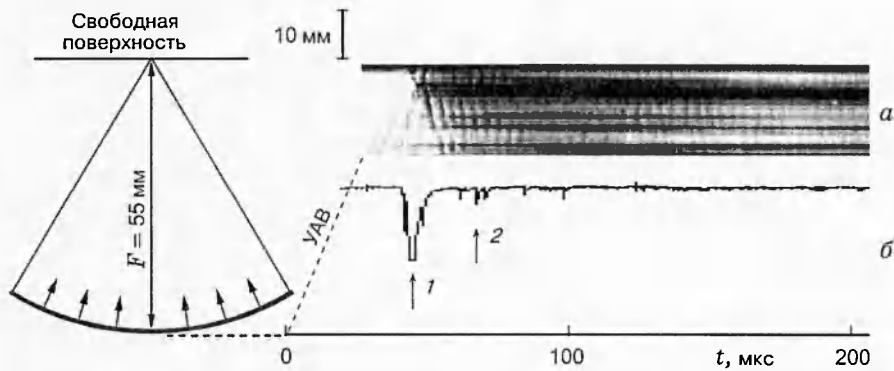


Рис. 3. Фоторегистрограмма (а) и осциллограмма световых соновспышек (б) в едином масштабе времени при сферической фокусировке ударно-акустической волны вблизи свободной поверхности воды

мой волне запускалась плоская УАВ ($p \approx 2 \div 6$ МПа) с задержкой t_3 , удовлетворяющей условию $T_1/4 < t_3 < T_1$ (T_1 — первый период пульсации пузырька). Время задержки t_3 выбиралось так, чтобы микропузырьки с $D < 0,1$ мм успевали захлопнуться к моменту прихода плоской волны. Таким образом исключался вклад световой эмиссии от захлопывания микропузырьков, не наблюдаемых кино съемкой. При этом, как следует из фоторегистрограмм, радиус и динамика наблюдаемых пузырьков существенно не менялись.

Дополнительно в этой же серии были проведены эксперименты при прохождении плоской УАВ через завесу из газовых пузырьков в

воде ($D \approx 2 \div 5$ мм), получаемых прокачкой воздуха через десять микропор на дне кюветы, на линии, перпендикулярной направлению УАВ. В этих экспериментах также зарегистрировано свечение в момент прохождения плоской УАВ через зону газовых пузырьков.

В обоих случаях амплитуда световых вспышек возрастает с увеличением амплитуды плоской УАВ.

На основании проведенных серий экспериментов можно предположить, что при прохождении УАВ через жидкость с воздушными пузырьками свечение возникает вблизи фазовой границы пузырьков за счет развития кавитационных процессов вблизи поверхности пузырь-

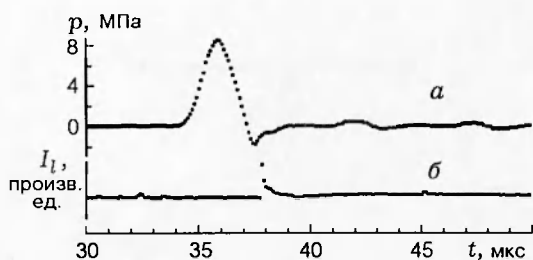


Рис. 4. Осциллограммы давления p в фокусе (а) и интенсивности светового излучения I_l из фокальной области (б) при фокусировке ударно-акустической волны вблизи свободной поверхности 10 %-го раствора глицерина в воде (период дискретизации 100 нс)

ка с периодом пульсаций, существенно превышающим длительность ударно-акустической волны. Эти процессы могут быть аналогичны тем, которые наблюдаются при взаимодействии плоской или сфокусированной УАВ со свободной поверхностью, но в меньшем масштабе. При этом может реализовываться процесс коалесценции пузырьков за счет большой разницы поверхностных сил для пузырьков разных размеров.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существовании нескольких механизмов свечения жидкости при кавитации в дополнение к уже известному механизму при схлопывании пузырька. Эти механизмы связаны с разрывом жидкости в волне разрежения.

Анализ представленных результатов и результатов работ [5, 9] позволяет предположить, что один из возможных механизмов наблюдаемого свечения при растяжении и разрыве жидкости и при прохождении УАВ через кавитирующую жидкость или через жидкость с пузырьками газа может обуславливаться электрокинетическими процессами. Так, в [9] экспериментально были зарегистрированы импульсы электрического напряжения в зоне разрыва жидкости. На этом основании можно предполагать, что в момент кавитационного

разрыва жидкости и при коалесценции пузырьков может происходить электрический разряд, который сопровождается эмиссией света.

Авторы благодарны В. В. Митрофанову за поддержку работы и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lohse, Detief. Lasers blow a bigger bubble // Nature. 1998. V. 392, N 6671. P. 21.
2. Putterman S. J. Sonoluminescence: sound into light // Scientific Amer. 1995. V. 272, N 2. P. 31-37.
3. Crum L. A. Sonoluminescence, sonochemistry, and sonophysics // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 95, N 1. P. 559-562.
4. Moss W. C., Clarke D. B., White J. W., Young D. A. Sonoluminescence, shock waves, and micro-thermonuclear fusion // Proc. of the Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Seattle, Washington, August 13-18, 1995. P. 453-458.
5. Маргулис М. А. Сонолюминесценция в системах с сфокусированными ультразвуковыми волнами // Журн. физ. химии. 1995. Т. 69, № 12. С. 2217-2222.
6. Тесленко В. С., Данилова Ю. Э., Сафонов В. П. Кинетика сонолюминесценции и образование коллоидных частиц при фокусировке ударных волн в жидкости // Акустика неоднородных сред. (Динамика сплошной среды: Вып. 112). Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 1997. С. 235-241.
7. Тесленко В. С. Ударно-акустический пробой в жидкости. Кинетика вынужденного акустического рассеяния при фокусировке ударных волн // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 5. С. 51-56.
8. Андриянов Ю. В., Ли А. А., Тесленко В. С. Неинвазивное формирование локальных кавитационных разрезов в биологических средах // Акустика неоднородных сред. (Динамика сплошной среды: Вып. 105). Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 1992. С. 28-37.
9. Стебновский С. В. О механизме импульсного разрушения жидкого объема // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1989. № 2. С. 126-132.

Поступила в редакцию 12/VII 1999 г.