

УДК 532.528; 536.423

СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ ФЛУКТУАЦИЙ ПРИ КАВИТАЦИИ ГЛИЦЕРИНА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ*

В.Н. СКОКОВ, В.П. КОВЕРДА, А.В. РЕШЕТНИКОВ, А.В. ВИНОГРАДОВ

Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург

Приведены результаты экспериментального изучения ультразвуковой кавитации глицерина. Вблизи поверхности излучателя формировались структуры взаимодействующих парогазовых пузырьков, имеющие вид фрактальных кластеров. Методом фотометрии прошедшего лазерного излучения исследована динамика флуктуаций. В переходном режиме спектр мощности флуктуаций изменялся обратно пропорционально частоте. Распределения локальных флуктуаций отличаются от гауссовских и проявляют свойства масштабной инвариантности. Исследовано качественное поведение частотной зависимости спектральной плотности флуктуаций при изменении мощности ультразвукового излучателя. Показано, что увеличение высокочастотной границы фликерного поведения свидетельствует о нарастании неустойчивости и может служить предвестником возможных крупномасштабных выбросов.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование динамики флуктуаций в кризисных и переходных режимах тепломассообмена показало наличие нерегулярных высокоэнергетических пульсаций со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте, так называемым $1/f$ спектром [1]. Характерная черта таких режимов заключается в том, что значительная часть энергии пульсаций связана с очень медленными процессами и означает возможность больших высокоэнергетических выбросов в системе. Другой характеристикой таких режимов является масштабная инвариантность функции распределения флуктуаций. Стационарные случайные процессы со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте, часто наблюдаются в природных явлениях [2]. Однако несмотря на широкую распространенность, общепринятая модель таких случайных процессов отсутствует, появление $1/f$ спектра объясняется разными причинами и строятся различные модели явления. Наличие низкочастотной $1/f$ составляющей спектра мощности означает возможность крупномасштабных флуктуаций и говорит о неустойчивом поведении системы. В этой связи важным является вопрос о сценариях ее перехода к $1/f$ спектрам. Анализ изменения спектра мощности при изменении управляющего параметра, в частности уменьшение низкочастотной границы $1/f$ поведения, позволяет судить о нарастании неустойчивости в системе.

Теория показывает, что $1/f$ флуктуации могут возникать в физических системах из-за одновременного протекания разнородных фазовых переходов в присутствии белого шума достаточной интенсивности [3]. Такая ситуация реализуется, в частности, при кавитации жидкостей в ультразвуковом поле [4, 5]. Образование кавитационных

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-08-01320а).

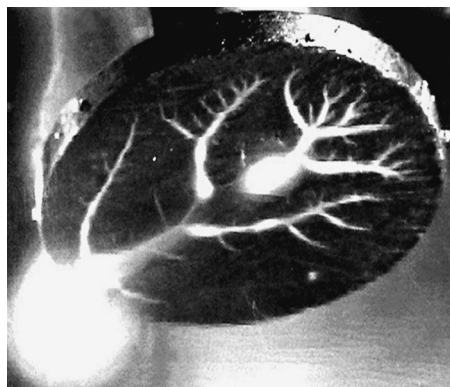
облаков при ультразвуковом воздействии можно рассматривать как неравновесный фазовый переход в сложной системе взаимодействующих кавитационных полостей и акустических волн. В акустическом поле формируется стационарный случайный процесс с неравновесными фазовыми переходами, спектр мощности которых может иметь $1/f$ вид. Сложный характер взаимодействия образующихся парогазовых пузырей между собой и с акустическим полем может приводить к формированию различных пространственных структур. Структуры из парогазовых пузырьков, напоминающие фрактальные кластеры, обнаружены экспериментально при возникновении стоячих волн в ультразвуковом поле [6]. Такие структуры были названы акустическими фигурами Лихтенберга [6, 7]. В работе [7] предложена теоретическая модель, согласно которой в системе кавитационных пузырьков, находящихся в акустическом поле, возникает неустойчивость, приводящая к пространственной самоорганизации. При размерах ультразвукового излучателя, соизмеримого с длиной звуковой волны, могут формироваться квазидвумерные кластеры вблизи поверхности излучателя [8, 9]. Сложный характер взаимодействия кавитационных полостей между собой и с акустическими волнами в экспериментальной ячейке может приводить к формированию бистабильности и к переходам между стационарными состояниями [10, 11].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования спектральной плотности флуктуаций при акустической кавитации глицерина.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились с использованием стандартного магнитострикционного источника ультразвуковых колебаний УЗДН-2Т с частотой 22 кГц. Излучатель с диаметром рабочего торца 15 мм помещался вертикально в оптическую кювету с плоскопараллельными стенками из оптического кварца размерами 120×60×40 мм. Кювета заполнялась глицерином на высоту ~ 120 мм. Излучатель погружался приблизительно на половину глубины кюветы. Источник ультразвуковых колебаний позволял изменять мощность излучателя, с увеличением которой возникала кавитация. Количественного измерения мощности излучателя в настоящих экспериментах не проводилось.

При плавном изменении частоты излучателя в кювете возникали резонансные явления, которые наряду с полем стоячих волн [8, 9] приводили к усилению кавитации. При этом вблизи поверхности излучателя формировались структуры, создаваемые взаимодействующими кавитационными пузырьками и имевшие вид фрактальных кластеров (рис. 1). Парогазовый поток был направлен от периферии к центру кластера. Отдельные кластеры могли отрываться от поверхности



и переходить в объем жидкости. Согласно данным работ [8, 9] фрактальные структуры вблизи поверхности излучателя формируются при акустической интенсивности $1,5 \div 8$ Вт/см². Можно предполагать, что в настоящих опытах она варьировалась в тех же пределах. Следует отметить, что, по сравнению

Рис. 1. Кавитационная область вблизи поверхности излучателя.

с опытами на воде [4, 5], образующиеся структуры оказались более долгоживущими и имели более контрастный вид.

Для исследования динамики флуктуаций через оптическую кювету с глицерином пропускался луч лазера длиной волны 0,65 мкм и диаметром пучка 1 мм. Интенсивность прошедшего лазерного излучения регистрировалась фотодиодом марки ФД265 чувствительностью 0,5 А/Вт и записывалась в память компьютера при помощи 8-канальной 12-разрядной АЦП ICP DAS A-8111 с длиной выборки 65536 точек и интервалом между точками 0,5÷5 мс. Величина сигнала определялась по цифровому осциллографу HAMEG HM-1507-3.

Луч лазера пропускался через различные участки кавитационной области. Полученные результаты слабо зависели от того, в какую часть кавитационного облака направлялся луч. При увеличении мощности излучателя и некотором варьировании частоты интенсивность флуктуаций резко возрастала, и можно было наблюдать переходы между двумя уровнями колебаний. Спектр мощности флуктуаций определялся методом быстрого Фурье-преобразования (рис. 2) записанных сигналов. На рисунке видно, что $1/f$ поведение спектра прослеживается при изменении частоты колебаний более чем на три порядка величины.

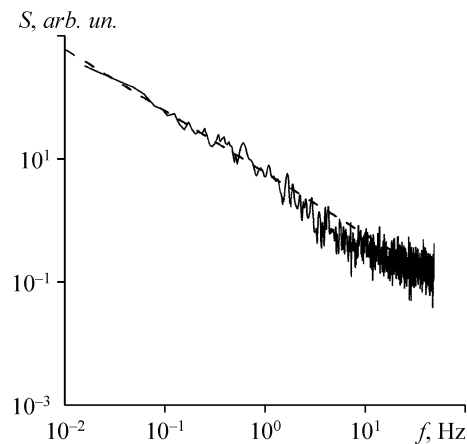
По реализациям сигнала определялись также функции распределения флуктуаций, бимодальный характер которых проявлялся при масштабных преобразованиях исходных реализаций функции распределения флуктуаций. Огрубленные реализации создавались из записанных сигналов их усреднением по некоторому масштабу времени τ в соответствии с формулой

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=\tau j}^{\tau(j+1)-1} x_i, \quad 0 \leq j \leq N/\tau,$$

где в качестве стохастической переменной x_i выступала интенсивность фототока. Последовательность огрубленных реализаций при различных значениях τ и соответствующие функции распределения приведены на рис. 3 (кривые 2–4). Видно, что с ростом коэффициента масштабных преобразований огрубленные реализации и их функции распределения становятся одинаковыми (перестают зависеть от τ). Иными словами, распределение флуктуаций становится масштабно инвариантным. Само по себе наличие коротковолновых высокоамплитудных выбросов не оказывает влияния на масштабную инвариантность и $1/f$ поведение спектров мощности, т. к. с ними связана очень малая энергия. Следует заметить, что поведение функции распределения при неравновесных фазовых переходах отличается от поведения функции распределения турбулентных пульсаций, в последнем случае огрубление реализаций приводит к ее гауссовскому виду (см., например, [12]).

Рис. 2. Спектр мощности флуктуаций фототока при акустической кавитации глицерина.

Штриховая линия — зависимость $\sim 1/f$.



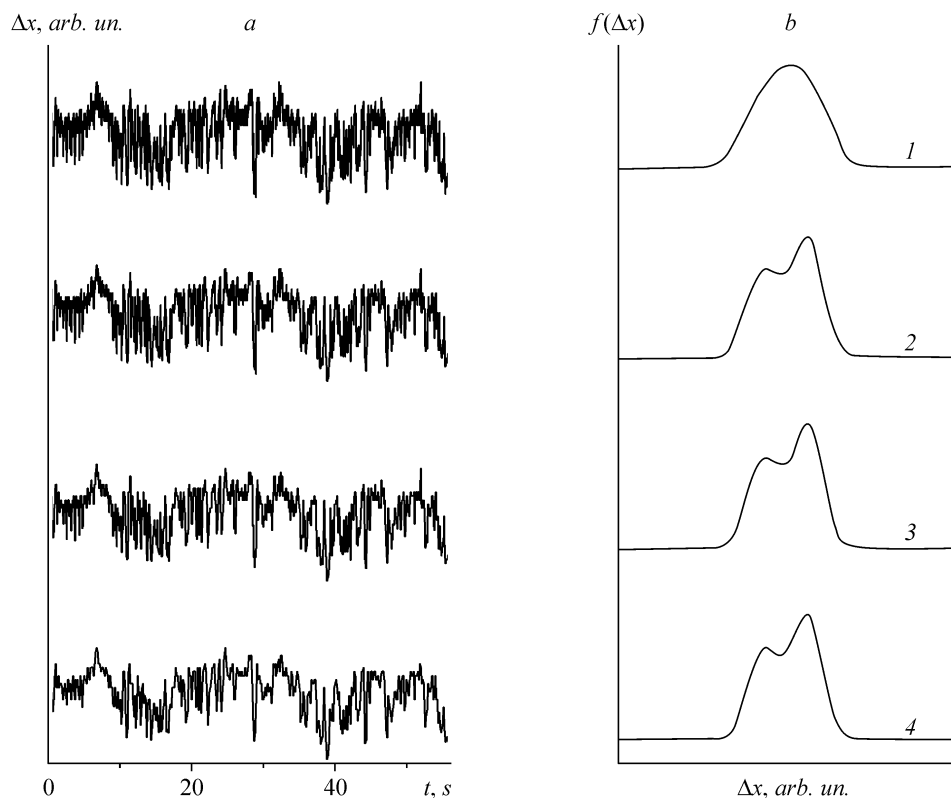


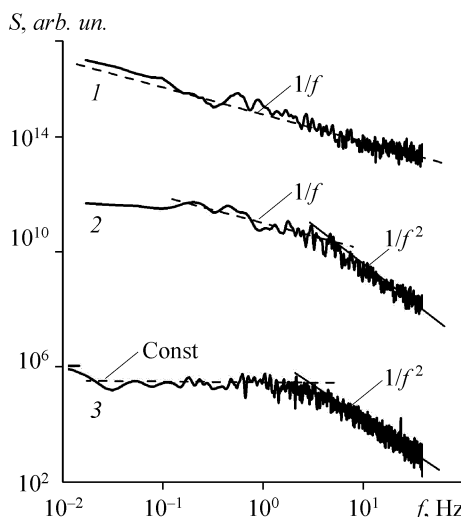
Рис. 3. *a* — исходная (1) и огрубленные (2–4) экспериментальные реализации флуктуаций фототока при акустической кавитации глицерина при коэффициенте масштабного преобразования τ : 1 (1), 30 (2), 100 (3), 200 (4); *b* — соответствующие функции распределения.

Об устойчивости стационарного случайного процесса можно судить по поведению низкочастотной составляющей спектров мощности. Горизонтальная полка на них в области низких частот свидетельствует о стационарности процесса и устойчивости системы. Фликерное поведение спектра мощности означает возможность катастрофических выбросов и говорит о неустойчивом поведении. При исследовании динамики флуктуаций при переходе от пузырькового к пленочному кипению на проволочном нагревателе было найдено, что с увеличением мощности нагревателя низкочастотная граница $1/f$ поведения спектров сдвигается в область более высоких частот, и это сопровождается смещением высокочастотной границы $1/f$ поведения в область низких частот [13]. Иными словами, увеличение (сдвиг в область высоких частот) низкочастотного предела $1/f$ флуктуаций сопровождается уменьшением высокочастотной границы фликерного поведения. В настоящей работе исследовано изменение спектров мощности в зависимости от мощности ультразвукового излучателя.

При увеличении мощности излучателя на спектрах появлялась горизонтальная полка в области низких частот. Одновременно с этим частотная зависимость в области высоких частот становилась более сильной. На рис. 4 показано изменение спектров мощности флуктуаций при кавитации глицерина с увеличением мощности излучателя. Видно, что увеличение низкочастотного предела фликер-шума сопровождается уменьшением высокочастотной границы фликерного поведения.

Рис. 4. Изменение спектральной плотности флуктуаций при увеличении мощности ультразвукового излучателя, график 1 соответствует наименьшей мощности, 3 — наибольшей.

Рис. 4 иллюстрирует сценарий перехода к $1/f$ поведению спектров при изменении управляющего параметра. Увеличение высокочастотной границы фликерного поведения свидетельствует о нарастании неустойчивости системы и может служить предвестником возможных крупномасштабных выбросов.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, акустическая кавитация жидкостей может сопровождаться образованием различных пространственных структур и низкочастотной расходимостью спектров мощности. Функция распределения флуктуаций при огрублении реализаций проявляет масштабно-инвариантные свойства. Обратная пропорциональная зависимость спектров мощности от частоты, масштабная инвариантность функций распределения флуктуаций, фрактальный характер кавитационных структур свидетельствуют о критическом поведении системы. При переходе к режиму с низкочастотной $1/f$ расходимостью спектров мощности уменьшение низкочастотного предела фликерного поведения сопровождается увеличением высокочастотной границы такого поведения. Экспериментальное наблюдение низкочастотной границы может быть сопряжено с трудностями, поскольку такие эксперименты требуют большого количества времени. Поэтому для прогнозирования устойчивости флуктуационного процесса можно судить по изменению высокочастотной границы фликерного поведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skokov V.N., Koverda A.V., Reshetnikov A.V., et al. $1/f$ noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer // *Inter. J. Heat and Mass Transfer.* — 2003. — Vol. 46. — P. 1879–1883.
2. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. — М.: ТОО “Янус”, 1995. — 624 с.
3. Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П. $1/f$ — при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель // *ЖЭТФ.* — 1998. — Т. 113, № 5. — С. 1748–1757.
4. Коверда В.П., Скоков В.Н., Решетников А. В., Виноградов А.В. Пульсации с $1/f$ -спектром мощности при акустической кавитации воды // *Теплофизика высоких температур.* — 2005. — Т. 43. Вып. 4. — С. 631–636.
5. Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V. $1/f$ fluctuations under acoustic cavitation of liquids // *Physica A.* — 2006. — Vol. 364. — P. 63–69.
6. Lauterborn W., Schmitz E., Judt A. Experimental Approach to a Complex Acoustic System // *Inter. J. Bifurcation Chaos.* — 1993. — Vol. 3, № 3. — С. 635–642.
7. Akhatov I., Parlitz U., Lauterborn W. Towards a theory of self-organization phenomena in bubble-liquid mixtures // *Phys. Rev. E.* — 1996. — Vol. 54. — P. 4990–5003.
8. Moussatov A., Granger C., Dubis B. Cone-like bubble formation in ultrasonic cavitation field // *Ultrasonics Sonochemistry.* — 2003. — Vol. 10. — P. 191–195.

9. **Moussatov A., Mettin R., Granger C., Tervo T., Dubis B., Lauterborn W.** Evolution of acoustic cavitation structures near larger emitting surface // Proc. WCU 2003, September 7-10, 2003, Paris. — P. 955–958.
10. **Максимов А.О., Соседко Е.В.** Особенности нелинейной динамики газового пузырька под действием резонансного и шумового акустических полей // Письма в ЖТФ. — 2003. — Т. 29, вып. 3. — С. 40–45.
11. **Санкин Г.Н., Тесленко В.С.** Двухпороговый режим кавитации // Докл. АН. — 2003. — Т. 393, вып. 6. — С. 762–765.
12. **Carbone V., Cavazzana R., Antoni V., et. al.** To what extent can dynamical models describe statistical features of turbulent flows? // Europhysics Lett. — 2002.— Vol. 58. — P.349–355.
13. **Скоков В.Н., Решетников А.В., Коверда В.П., Виноградов А.В.** Фликер-шум при кризисе кипения воды // Тр. Третьей рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 4. Кипение, кризисы кипения, закритический теплообмен. Испарение и конденсация. — М.: Изд-во МЭИ, 2002. — С. 169–172.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2006 г.