

08;12

Сила, действующая на цилиндр при ультразвуковой кавитации

© Г.Н. Санкин,¹ Н.В. Малых²

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: sankin@hydro.nsc.ru

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: malykh@itp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 20 июля 2004 г.)

С целью исследовать механизмы кавитационного воздействия на поверхность с микрокапиллярной несплошностью и уточнить модели звукокапиллярного (ЗК) эффекта проведено сравнение величин силы, действующей на цилиндр, и высоты подъема жидкости в капилляре при кавитации, измеренных для одной и той же точки ультразвукового (УЗ) поля. Обнаружено, что сила действует на цилиндр по направлению к кавитационному кластеру, стабилизированному вблизи торца цилиндра. Показано, что сила может быть увеличена с помощью второго цилиндра, расположенного со стороны кластера соосно с первым. Исследована динамика кавитационного кластера в зависимости от величины зазора между двумя цилиндрами, один из которых находился на маятниковом подвесе. Найдены условия возбуждения автоколебаний отклонения маятника. Исследованы зависимости силы притяжения между цилиндрами от частоты УЗ и величины зазора. Установлено, что усредненное по поверхности торца давление на цилиндр диаметром 1.2 mm достигало 0.16 кПа, а давление в капилляре было 0.89 кПа. Таким образом, по крайней мере частично ЗК эффект может быть обусловлен противодействием, возникающим при взаимодействии кавитационного кластера и капилляра. Эффект может быть применен для разработки датчиков кавитации и излучателей УЗ.

Введение

На тело в звуковом поле действует совокупность пондеромоторных сил: пропорциональные амплитуде звука и „квадратичные“ силы радиационного давления, а также гидродинамические силы Стокса и Бернулли. Однако при большой (выше 1 W/cm^2) интенсивности ультразвука основное воздействие на твердую поверхность связано с эффектами кавитации: ударными волнами при сферически-симметричном и кумулятивном захлопывании пузырьков и пузырьков кластеров, расклинивающего действия пузырьков и ЗК эффекта в порах твердого тела [1]. Звукокапиллярный (ЗК) эффект — подъем жидкости в капилляре за счет ультразвукового воздействия долгое время притягивает внимание исследователей [2] и имеет многочисленные практические приложения от очищения до диспергирования широкого набора материалов [3].

В зазоре между колеблющимися стенками возможно образование гидродинамических вихрей [4] и кавитационных пузырьков кластеров [1,5]. Схлопываясь кумулятивно (сферически или с образованием струйки), пузырьки и кластеры производят короткие по сравнению с периодом УЗ импульсы давления, вызывающие эрозию [5,6]. Вблизи торца твердого стержня и капилляра, помещенных в УЗ поле, наблюдались аналогичные явления (вихри, кавитация), определяющие ЗК эффект [7] и давление на твердую стенку. Измерение давления, действующего на торец капилляра при кавитации, может стать решающим экспериментом в пользу правильности той или иной модели ЗК явления. До настоящего времени вопрос о точке приложения противодействующей

силы, влияющей на течение жидкости в капилляре, остается неясным.

Результаты исследования динамики силы, действующей на твердый цилиндр в УЗ поле при кластерной кавитации, представлены в данной работе.

Постановка экспериментов

Схема установки приведена на рис. 1, а. Стоячая ультразвуковая волна возбуждалась с помощью сферического пьезоэлектрического преобразователя 1, помещенного в сосуд с исследуемой жидкостью. Преобразователь, выполненный в виде сферы из посеребренной керамики ЦТС-19 диаметром около 50 mm, подключен к самодельному генератору прямоугольных импульсов амплитудой 90–120 V, с частотой $f = 26–31 \text{ kHz}$ через переменную индуктивность для настройки резонанса и получения синусоидального сигнала. Форма сигнала контролировалась с помощью осциллографа TDS 210 (Tektronix), подключенного к излучателю через делитель.

Сфера с тремя прорезями 10 для наблюдения устанавливалась на подложке из вакуумной резины 9 в стеклянный химический стакан 2 емкостью 1l, заполняемый водой. Концентрация газа в воде была предварительно понижена нагревом. Затем вода охлаждалась до температуры 35–45°C и использовалась в экспериментах в течение нескольких часов. Уровень жидкости 8 находился выше вершины излучателя на величину $h = 19–29 \text{ mm}$. Так как в сосуде устанавливалась стоячая волна с целым числом полуволн, укладываемых по высоте столба жидкости, резонансная частота f_s зависела от h .

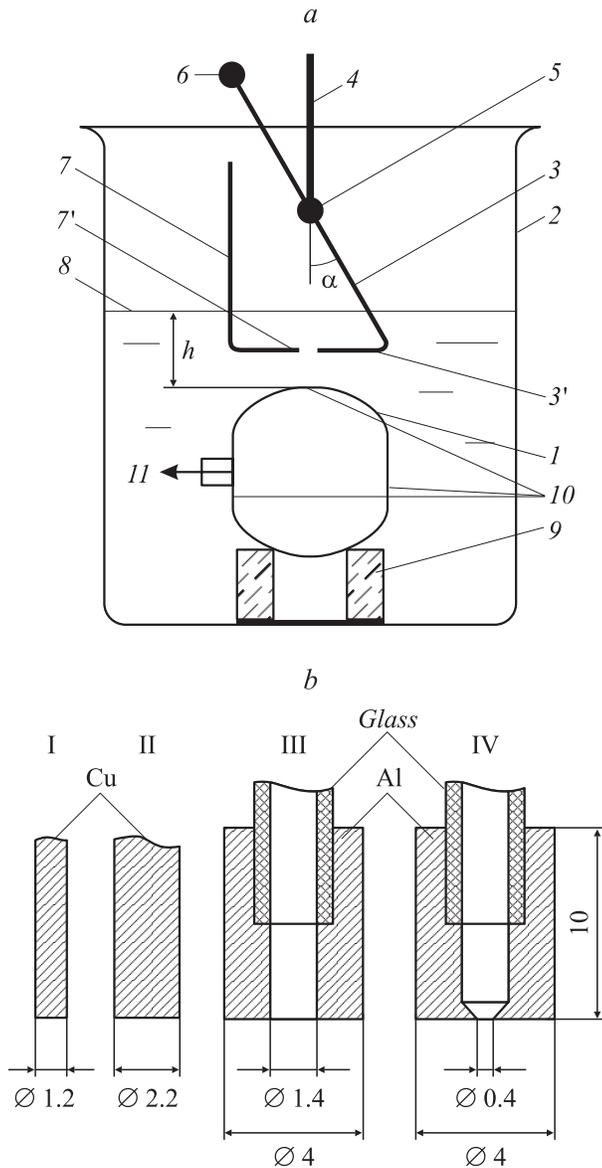


Рис. 1. *a* — схема установки: 1 — пьезокерамическая сфера; 2 — химический мерный стакан; 3 — маятник, 7 — вспомогательная проволочка; 3', 7' — цилиндры, 4 — подвес маятника; 5 — шарнир; 6 — противовес; 8 — свободная поверхность жидкости; 9 — резиновое кольцо; 10 — прорези для наблюдения; 11 — УЗ генератор; *b* — схема использованных проволочек (I, II) и капилляров (III, IV).

Над излучателем свободно подвешен с помощью шарнира 5 маятник 3 с прикрепленным на его конце цилиндром из медной проволоки в лаковой изоляции. Схема использованных цилиндров диаметром $d = 1.2\text{--}2.2$ mm приведена на рис. 1, *b* (I, II).

По методике, описанной в [7], добивались стабилизации кавитационного кластера вблизи торца цилиндров 7' и 3'. Кавитация приводила к отклонению маятника $\Delta\alpha$ от положения равновесия, которое измеряли по смещению цилиндра. Независимо от того, была ли торцевая и боковая поверхности одинаково обработаны надфилем или была обработана только торцевая поверхность, а

боковая оставалась покрытой лаком, можно добиться, чтобы облачко было стабилизировано у торца цилиндра в обоих случаях. Это можно объяснить тем, что устойчивость кластера вблизи плоского торца больше, чем около выпуклой стенки цилиндра.

В случае, если кавитационный кластер на цилиндре 3' не образовывался спонтанно, для вынужденного создания кластера использовали проволочку 7, которую подносили поочередно к излучателю и к цилиндру. Проволочку, оказывающую стабилизирующее (локализирующее) действие [7] на пузырьковый кластер, помещали в область наибольшего давления, в пучность стоячей волны. Затем ее перемещали в нужное место, при этом кластер перемещался вместе с проволочкой, в данном случае к торцу исследуемого цилиндра.

Известно, что ЗК эффект можно усилить, прижав капилляр к излучателю [2]. Для моделирования этого явления мы использовали вспомогательный цилиндр 7' диаметром 1.05 mm, изготовленный из медной проволоки со снятой лаковой изоляцией, который мог располагаться симметрично относительно оси излучателя, соосно с цилиндром 3'.

За зазором между цилиндрами велись визуальные наблюдения и теневая киносъемка процесса камерой SensiCam Fast Shutter (PCO, Kelheim, Germany) с частотой 30–150 кадров в секунду (время экспозиции 1 ms). Подсвечивание осуществлялось лампой накаливания через матовое стекло. Для уменьшения искажений цилиндрической стенкой стакана перед объективом видеокамеры на стакан герметично наклеивали стеклянную пластинку $32 \times 37 \times 3$ mm и заливали зазор жидкостью с показателем преломления, близким к исследуемой жидкости (та же самая жидкость, что и в стакане).

По регистрируемому с помощью киносъемки отклонению маятника $\Delta\alpha$ в гравитационном поле Земли можно определить действующую на цилиндр силу F . Калибровка системы осуществлялась грузами известной массы,

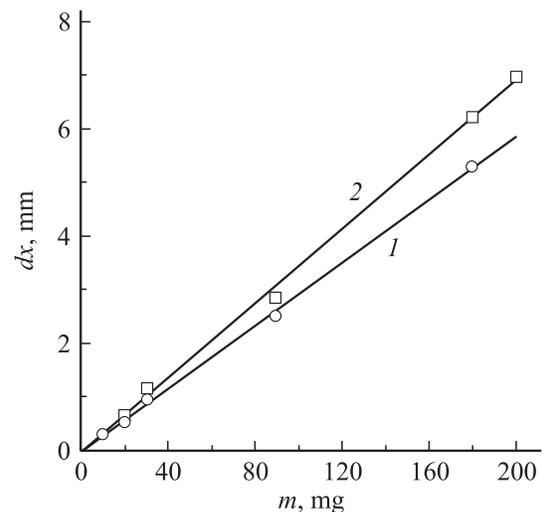


Рис. 2. Калибровочная кривая для маятника с цилиндром диаметром 1.2 (1) 2.2 mm (2).

подвешенными с помощью блока и тонкой нити к концу маятника, находящемуся в воздухе. Калибровочная кривая показана на рис. 2. Найденные зависимости практически линейны с коэффициентом наклона K , зависящим от подвешенного груза и массы противовеса. Найдено, что K равен $28 \mu\text{m}/\text{mg}$ для $d = 1.2 \text{ mm}$ и $35 \mu\text{m}/\text{mg}$ для $d = 2.2 \text{ mm}$.

С целью сравнения эффекта силы, действующей на цилиндр, с величиной ЗК эффекта изготовлен капилляр из алюминия с прозрачным для наблюдения высоты подъема стекляннным отростком (рис. 1, *b*, схема III, IV).

Результаты

Визуальные наблюдения показали, что цилиндр смещается только в случае наличия кавитационного кластера вблизи его торца.

Цифровая киносъемка позволила измерить силу, отклоняющую маятник от положения равновесия. Зависимость силы F , действующей на цилиндр, от частоты ультразвука f приведена на рис. 3. Данные для каждой точки были усреднены по трем измерениям. Эта зависимость имеет резонансный характер, причем для большего диаметра ширина резонанса больше (рис. 3, *b, c*). Для диаметра цилиндра 2.2 mm он находится ($h = 19 \text{ mm}$) приблизительно при $f_s = 29.67 \text{ kHz}$, а для $h = 29 \text{ mm}$ — при $f_s = 27.58 \text{ kHz}$. Большее значение силы было получено для цилиндра с меньшим диаметром и составляло около 15 mg (рис. 3, *a*). Отрицательные значения силы обусловлены кластером, стабилизированным на боковой поверхности цилиндра.

Если рядом с цилиндром $3'$ поместить второй цилиндр $7'$, как показано на рис. 4, *a*, с зазором x_0 между ними, то цилиндры притягиваются (рис. 4, *b*),

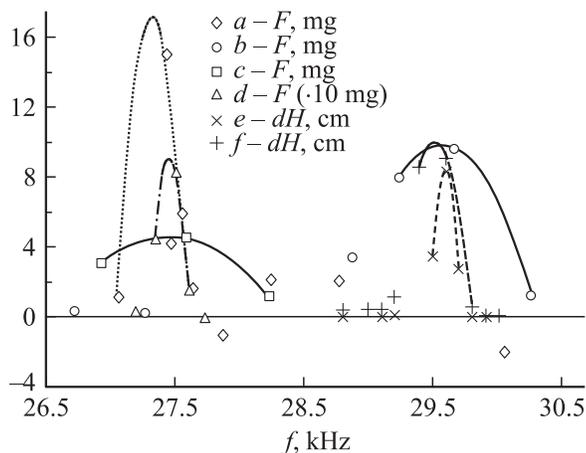


Рис. 3. Зависимость силы от частоты ультразвука для одного цилиндра. Диаметр цилиндра 1.2 mm (*a*), 2.2 mm (*b, c*), для двух цилиндров (*d*). Зависимость высоты подъема жидкости в капилляре из алюминия от частоты. Внутренний диаметр капилляра: 1.4 mm (*f*), 0.4 mm (*e*); расстояние от излучателя до уровня жидкости $h = 19 \text{ mm}$ (*a, c, d*); 29 mm (*b, e, f*).

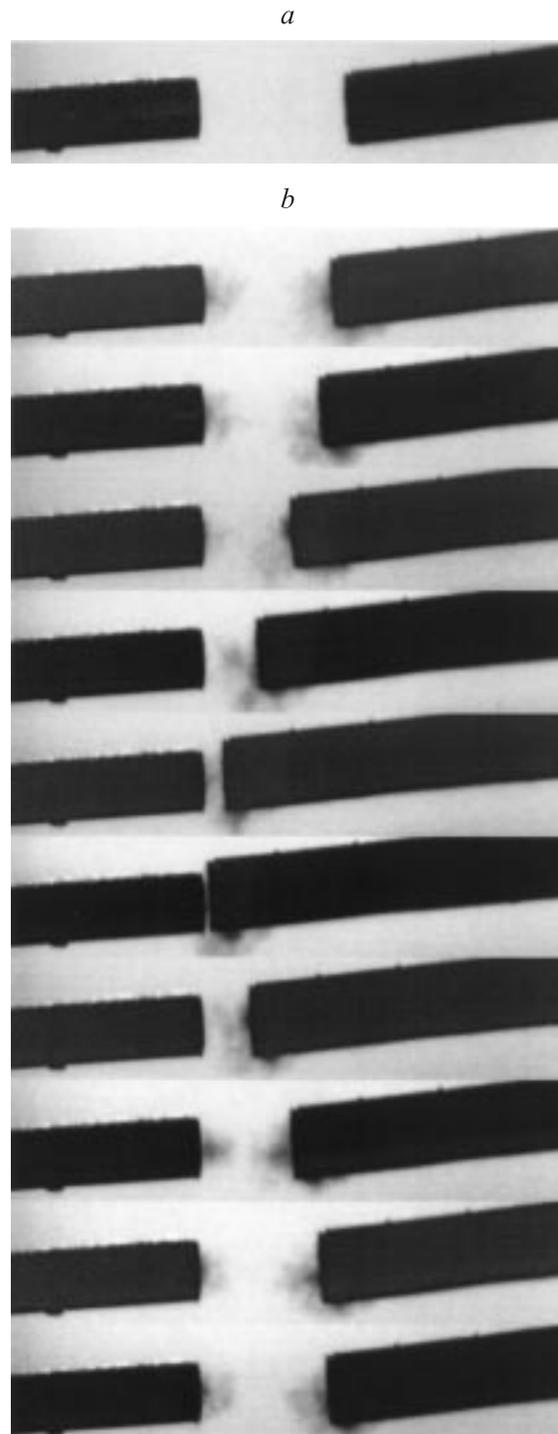


Рис. 4. Кадры киносъемки цилиндра, прикрепленного к маятнику (находится справа, диаметр 1.2 mm) и вспомогательной проволоочки (слева): *a* — ультразвук выключен, *b* — с ультразвуком со стабилизированными кавитационными кластерами вблизи торцов. Время экспозиции 1 ms . Время между кадрами 67 ms .

тем самым увеличивая измеряемую силу, действующую на правый цилиндр. В этом случае на рисунке хорошо видно образование кавитационных кластеров вблизи торцов притягивающихся цилиндров. При дальнейшем

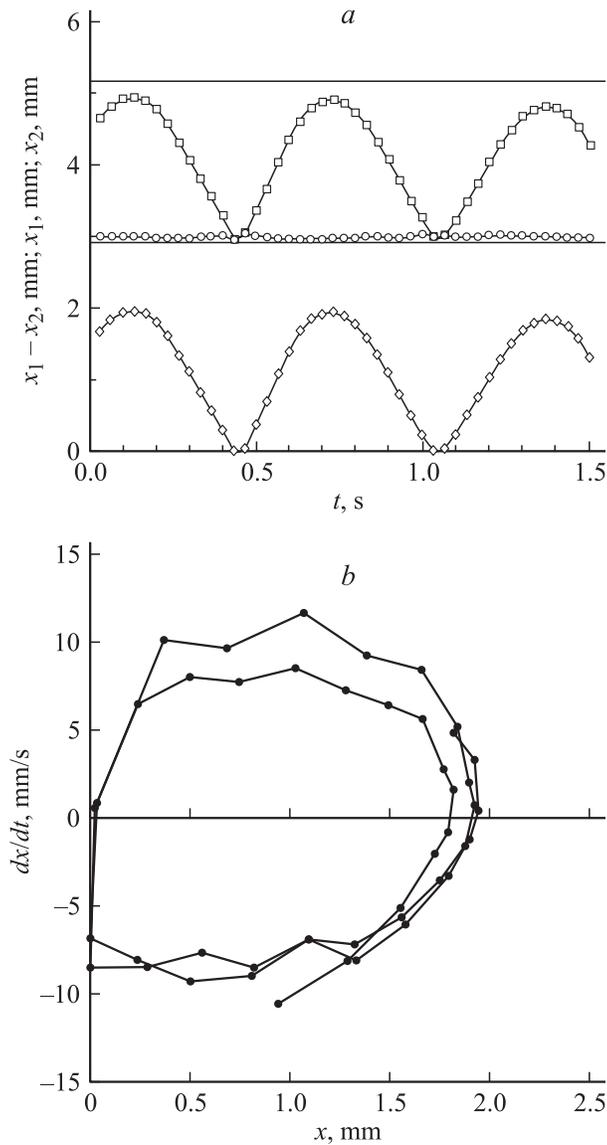


Рис. 5. *a* — автоколебания величины зазора (ромбы), координат левого (кружки) и правого (квадраты) цилиндров от времени. Сплошные кривые — равновесные значения координаты торца цилиндров (без ультразвука), *b* — фазовая диаграмма автоколебаний маятника при кавитации. x_1, x_2 — координаты левого и правого цилиндров.

ближайшем рассмотрении (рис. 4, *b*, 6-й кадр сверху) было найдено, что эта сила уменьшается, если цилиндры соприкасаются. Отклонение маятника измеряли после затухания его колебаний. Зависимость силы, действующей между цилиндрами, от частоты ультразвука (УЗ) показана на рис. 3, *d*. Она имеет резонансный характер с максимумом при $f_s = 27.47 \text{ kHz}$. В максимуме значение силы достигало приблизительно 86 мг. Расстояние между цилиндрами вычисляется по формуле $x = x_0 - F^*K$.

При некоторой величине начального (УЗ выключен) зазора x_0 (показан на рис. 4, *a*) между цилиндрами после включения УЗ в системе возникает автоколебательный процесс, наблюдавшийся в опыте в течение нескольких минут.

На рис. 4, *b* показано изменение зазора и формы кавитационных кластеров вблизи торцов обоих цилиндров в течение одного периода колебаний. Можно видеть, что возникающая из-за кавитации средняя за период сила притягивает цилиндры друг к другу (среднее по времени положение правого цилиндра смещено относительно равновесного, показанного на рис. 4, *a*, т.е. $\langle x \rangle < x_0$). Левый маятник остается практически неподвижным, колеблется правый маятник (рис. 5, *a*). Эта притягивающая цилиндры друг к другу кавитационная сила тем больше, чем меньше зазор между цилиндрами. Однако к моменту соприкосновения цилиндров облачко вытесняется из зазора. Это приводит к уменьшению силы притяжения и правый маятник стремится вернуться в равновесное положение. Тем не менее по инерции правый маятник продолжает движение и соударяется с другим маятником. Затем с увеличением зазора образуется новый кластер пузырьков, притягивающий цилиндры и, процесс повторяется снова. Так как в системе существует указанная обратная связь, в ней развивается автоколебательный процесс.

На рис. 5, *b* показана зависимость расстояния x между двумя цилиндрами от скорости его изменения (фазовая диаграмма) для более чем двух периодов автоколебаний (частота ультразвука $f_s = 27.5 \text{ kHz}$). Период колебаний был около 0.6 s. Это соответствует частоте автоколебаний $f_a = 1.7 \text{ Hz}$ ($f_a \ll f_s$).

Звукокапиллярный эффект изучали для капилляра из алюминия, расположенного вертикально, при возбуждении кавитации вблизи его торца. Погружение устья капилляра в ту же область над излучателем, где находился цилиндр, приводила к увеличению высоты подъема жидкости в отростке при УЗ кавитации на величину dH (рис. 3, *e, f*) по сравнению с высотой подъема без УЗ за счет одних капиллярных сил. Из рисунка видно, что зависимость силы, действующей на цилиндр, и высоты подъема жидкости коррелируют. Обе зависимости имеют максимум вблизи частоты 29.6 kHz. Изменение высоты подъема жидкости в резонансе практически не зависит от диаметра входного отверстия капилляра и составляет около 8.4 и 9.1 см для наименьшего и наибольшего диаметров. Гидростатическое давление указанного столба жидкости достигает приблизительно 0.89 кПа, что в 5.7 раз превышает величину давления, усредненного по площади торца сплошного цилиндра $d = 1.2 \text{ mm}$.

Обсуждение

Известно некоторое количество моделей, посвященных ЗК явлению. Одна из них связывает ЗК эффект со струйным характером коллапса пузырька вблизи устья капилляра [2]. Если пузырек расположен на оси капилляра, можно ожидать, что пузырек будет захлопываться несферично с образованием кумулятивной струйки. После попадания струйки в канал капилляра жидкость в нем приобретет дополнительный импульс, за счет которого жидкость начинает подъем. Сила, действующая на капилляр, в этом случае направлена в сторону, противоположную скорости течения жидкости в канале. Заметим,

что в общем случае образование струйки необязательно. Достаточным является смещение центра масс пузырьков за счет так называемого импульса Кельвина [8]. В этом случае усиление сферической кумуляции энергии внутри пузырька не противоречит экспериментальным данным по увеличению интенсивности свечения кавитационного кластера [9].

Авторы [7] наблюдали при максимальном подъеме жидкости в капилляре на его торце образование кластера (но не одиночного пузырька), захлопывающегося сферически-симметрично. В условиях кавитации поле давлений в жидкости складывается из создаваемой излучателем стоячей волны внутри сферы и снаружи в сосуде, а также волн, порождаемых пузырьками. Давление в фазе разрежения не опускается ниже величины, соответствующей кавитационной прочности жидкости. Трансформация волны разрежения в волну сжатия (аналог „волны вскипания“) и давление излучения также приводят к положительной прибавке к величине давления, средней за период волны [10]. Таким образом, давление в кавитирующей жидкости может принимать пульсирующий характер со средним значением, превышающим гидростатическое давление. В этом случае сила, действующая на капилляр, направлена в ту же сторону, что и скорость течения жидкости в канале.

Анализ результатов измерения силы, действующей на цилиндр, показал, что сила действует по направлению к кавитационному кластеру, стабилизированному вблизи торца капилляра. Можно предположить, что при струйном характере схлопывания пузырька или кластера сила, действующая на жидкость, уравнивается силой, действующей на цилиндр за счет притяжения пузырьков к твердой стенке. Эта модель не описывает явление полностью, однако правильно предсказывает направление силы.

Так как давление на торец диаметром 1.2 mm в резонансе достигало 0.16 kPa, то по крайней мере частично ЗК эффект может быть обусловлен противодействием, возникающим при взаимодействии кавитационного кластера и капилляра. В пользу этого говорит и факт увеличения силы в присутствии противоположной твердой стенки (рис. 3, d). В максимуме значение силы превышало в 5.7 раз силу без второго цилиндра. Заметим, что и ЗК эффект может быть усилен, если капилляр вплотную прижат к стенке излучателя или резонатора [2].

Поэтому мы считаем, что ЗК эффект обусловлен суммой нелинейных эффектов кавитации, создающих положительное среднее давление в канале капилляра. Можно предположить, что сила, действующая на торец цилиндра, помещенного в центр излучателя, будет значительно выше, так как ЗК эффект максимален для капилляра, торец которого находится в центре сферы.

Модуляция кавитационной силы на цилиндр с помощью другого цилиндра приводит к возникновению автоколебаний системы. Для развития автоколебаний необходимым условием является превышение амплитуды колебаний над зазором, которое обеспечивает контакт

(соударение) цилиндров (рис. 4). Если соударение не наступает, при включении ультразвука колебания маятника являются затухающими с декрементом, обусловленным, например, вязкостью жидкости.

Заключение

Таким образом, показано, что при стабилизации кластера вблизи торца цилиндра на последний действует притягивающая сила, зависящая от интенсивности кавитации, а также динамики и формы кавитационного кластера. Эта зависимость выражается в резонансной зависимости силы от частоты ультразвука.

В некоторых условиях при ультразвуковом возбуждении кавитации в зазоре происходят автоколебания маятника. Их частота на несколько порядков меньше ультразвуковой частоты вынуждающих ультразвуковых колебаний и может находиться в звуковом диапазоне, вызывая шумы и вибрации аппарата.

Эти эффекты могут быть использованы для разработки датчиков кавитации и защиты ультразвуковых излучателей, а также для настройки кавитирующей системы в резонанс.

Авторы благодарят Л.И. Мальцева и В.С. Тесленко за поддержку работы и ценные замечания и С.В. Суродина за разработку и изготовление ультразвукового генератора прямоугольных сигналов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-02-17682), Интеграционного проекта СО РАН (№ 123) и гранта Службы академических обменов ФРГ (DAAD) на приобретение оборудования (цифровая камера).

Список литературы

- [1] Кувшинов Г.И., Прохоренко П.П. Акустическая кавитация у твердых поверхностей / Под ред. В.К. Кедринского. Минск, Наука і тэхніка, 1990. 112 с.
- [2] Прохоренко П.П., Дежкунув Н.В., Коновалов Г.Е. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск: Наука и техника, 1981. 135 с.
- [3] Малых Н.В., Кузьмин А.О., Петров В.М., Пестунова О.П. // Сб. тр. XI сессии Российского акустического общества. Т. 2. Акустические измерения, геоакустика, электроакустика, ультразвук. М.: ГЕОС, 2001. С. 296–299.
- [4] Jackson F. // JASA. 1960. Vol. 32. N 11. P. 1387–1395.
- [5] Hanson I., Kedrinskii V., Merch K.A. // J. Phys. D. 1982. Vol. 15. N 9. P. 1725–1734.
- [6] Кедринский В.К. ПМТФ. 1996. Т. 37. № 4. С. 22–31.
- [7] Malykh N.V., Petrov V.M., Sankin G.N. // Proc. 5th World Congress on Ultrasonics (WCU 2003). Paris, 2003. P. 1343–1346.
- [8] Blake J.R., Keen G.S., Tong R.P., Wilson M. // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1999. Vol. 357. P. 251–267.
- [9] Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P., Ignatenko P. // Proc. 5th World Congress on Ultrasonics (WCU 2003). Paris. 2003. P. 597–600.
- [10] Малых Н.В., Петров В.М. // Сб. тр. XIII сессии Российского акустического общества. Т. 1. Физическая акустика. М.: ГЕОС, 2003. С. 40–43.