

## МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 534.222

И.Н. Диденкулов<sup>1</sup>, А.И. Мартьянов<sup>2</sup>, Н.В. Прончатов-Рубцов<sup>2</sup>, В.А. Тихонов<sup>1,2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В ПЛОСКОМ АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского<sup>2</sup>

Приводятся результаты экспериментального исследования акустической кавитации, развивающейся в плоском открытом резонаторе. Выполнены измерения интенсивности кавитационного шума в разных режимах поля накачки. Теоретически рассмотрены особенности распределения пузырьков в резонаторе с течением жидкости.

*Ключевые слова:* кавитация, плоский резонатор, пузырьки, шум, измерения, поток жидкости, группировка пузырьков.

#### Введение

Акустическая кавитация – появление пузырьков в жидкости под действием акустического поля – является предметом исследования в течение многих лет [1-6]. Исследованию поведения пузырьков в акустических полях посвящено много работ. Газовые пузырьки, в том числе возникающие в процессе кавитации жидкости, используются в различных технологических процессах, в частности, в сонохимических реакциях и при изучении сонолюминесценции [7–10]. Необходимо отметить возрастающую роль пузырьков в медицинских приложениях: использование методов ультразвуковой диагностики биологических объектов, основанных на контрастных агентах [11], а также способы точной доставки лекарств к нужному органу человека с помощью пузырьков при минимальном воздействии на другие органы. Несмотря на широкое практическое использование кавитации, до настоящего времени далеко не все вопросы разрешены. Это связано со сложностью и многообразием процессов взаимодействия пузырьков с акустическим полем и между собой. Исследований кавитационных явлений в акустических резонаторах сравнительно немного. В то же время в стоячей волне акустического резонатора можно создать контролируемые условия для наблюдения за поведением пузырьков.

Целью данной работы было экспериментальное исследование процессов, происходящих в условиях существования кавитации в стоячей волне, и создание теоретической модели для описания поведения пузырьков в плоском резонаторе с движущейся жидкостью.

#### Экспериментальное изучение кавитации в плоском резонаторе

Изучение кавитации проводилось в открытом плоском акустическом резонаторе. Для наблюдения кавитационных процессов использовались дополнительная акустическая система и фототехника. Экспериментальная установка показана на рис. 1. Плоский открытый резонатор состоит из плоской акустической антенны со встроенным в нее акустическим преобразователем (в верхней части рис. 1) и плоского отражателя (в нижней части рисунка). Отра-

жатель был выполнен из плотного пенопласта, что обеспечивало коэффициент отражения звука от него, близкий к минус единице.

Дополнительная акустическая система представляет собой фокусирующее акустическое зеркало, также выполненное из пенопласта, и точечный акустический приемник- гидрофон, размещенный в сопряженной точке по отношению к точке на оси резонатора (рис. 1). Кроме того, с противоположной стороны резонатора можно было поместить дополнительный точечный акустический излучатель. В этом случае пробное акустическое поле от этого излучателя проходило через кавитационную зону и после отражения от фокусирующего зеркала попадало на гидрофон (режим «зондирование»). Дополнительная акустическая система позволяла осуществлять сканирование вдоль оси и поперек акустического резонатора. Фотография акустической установки приведена на рис. 2.

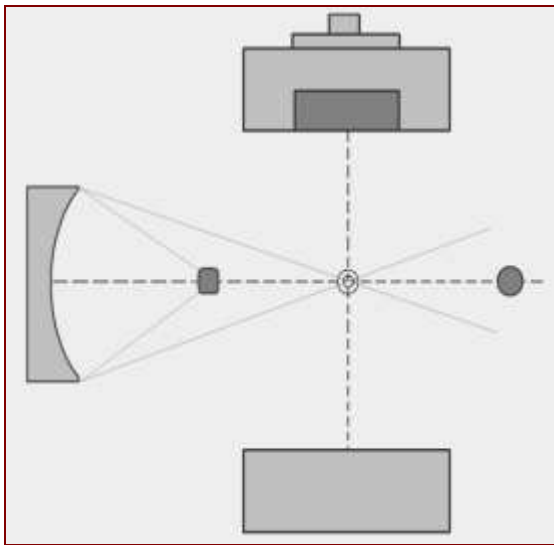


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

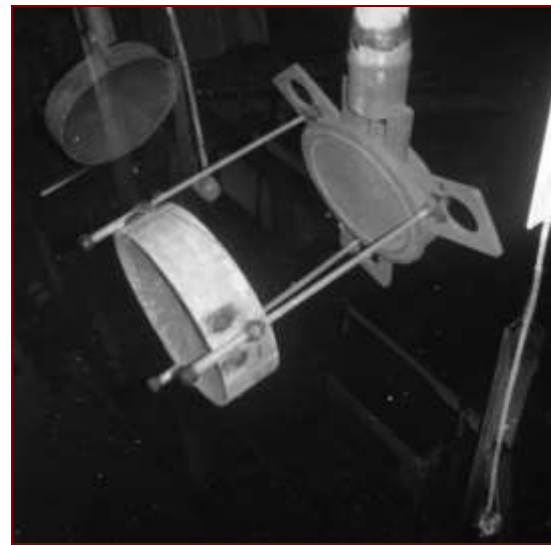


Рис. 2. Фото экспериментальной установки

Помимо измерения акустического шума из области кавитации дополнительная акустическая система в режиме «прием» позволяла измерять распределение акустического поля в резонаторе. Для этого в резонатор вводился специальный рассеиватель – металлический шарик диаметром 2 мм.

Известно, что кавитация возникает, если интенсивность акустического поля превышает определенный порог [1–6]. Начало кавитации можно определить по возникновению специфического акустического шума. На рис. 3 представлен спектр шума из области кавитации. В спектре четко проявляются пики на частотах, соответствующих сериям  $nf_0$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) и  $(m-1/2)f_0$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $f_0$  – частота накачки. В нашем случае частота поля накачки в резонаторе составляла  $f_0 = 156,435$  кГц. Подобный вид спектра кавитационного шума отмечался и в других экспериментах [2, 3, 6].

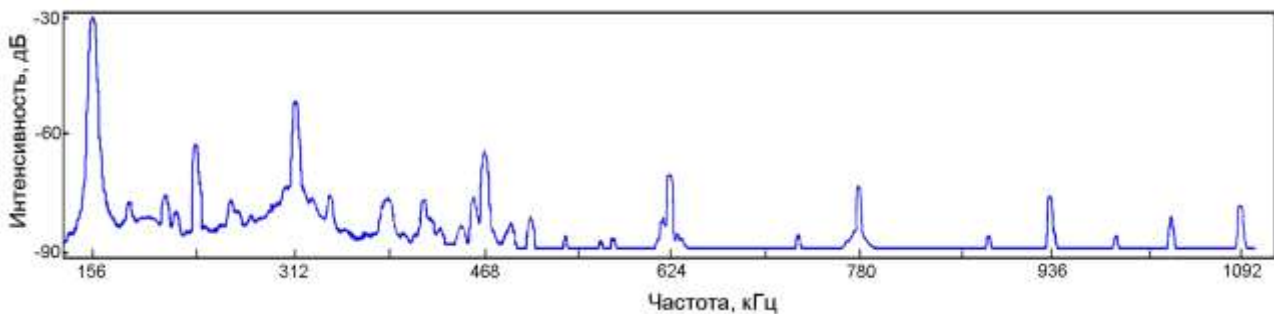
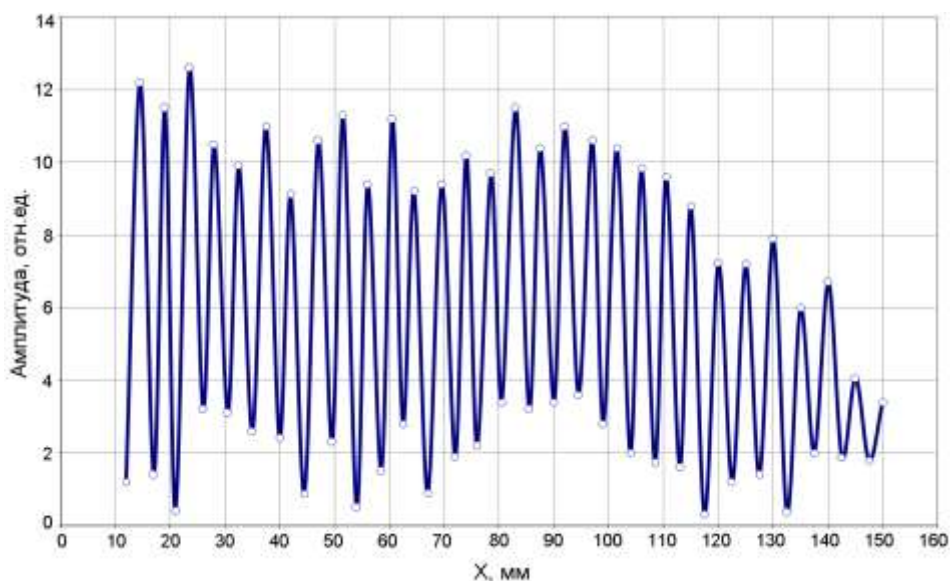


Рис. 3. Спектр кавитационного шума

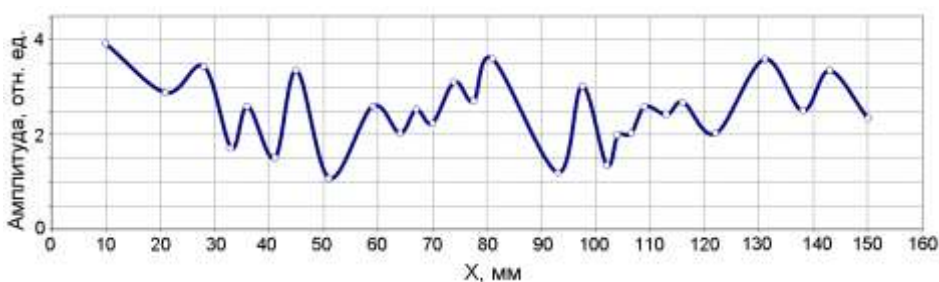
Методика измерения пространственного распределения поля в резонаторе в докавитационном режиме заключалась в измерении амплитуды рассеянного на рассеивателе – металлическом шарике сигнала при продольном проходе вдоль оси резонатора. Результат измерений представлен на рис. 4.



**Рис. 4. Продольное распределение поля в резонаторе в докавитационном режиме.  
Частота 156.435 кГц**

При увеличении мощности накачки и возникновении кавитации проводились измерения распределения интенсивности шума вдоль оси резонатора на частоте накачки. Результаты представлены на рис. 5.

Из сравнения данных на рис. 4 и рис. 5 видно, что в докавитационном режиме в резонаторе существует стоячая волна (рис. 4). В кавитационном режиме структура стоячей волны начинает разрушаться (рис. 5). Это связано с тем, что кавитационные пузырьки влияют на скорость и поглощение звука в резонаторе.



**Рис. 5. Структура поля в резонаторе на первой гармонике (156.435 кГц)  
в кавитационном режиме**

С помощью дополнительной акустической системы проводилось измерение продольных разрезов интенсивности кавитационного шума (в режиме «прием») и коэффициента ослабления пробного сигнала на разных частотах (в режиме «зондирование»). На рис. 6 и рис. 7 приведены примеры таких разрезов для частоты 1070 кГц (7-я гармоника частоты накачки).

Сложный характер распределения интенсивности шума и коэффициента ослабления пробной волны на частоте 1070 кГц связан с неравномерным распределением концентрации кавитационных пузырьков и акустическими течениями. На рис. 6 и рис. 7 слабо просматри-

ваются структура стоячей волны в резонаторе. Из полученных зависимостей видно хорошее согласование графиков интенсивности шума и коэффициента ослабления. Действительно, в областях с максимальным коэффициентом ослабления имеется максимальный шумовой сигнал, так как величины этих параметров зависят от концентрации пузырьков.

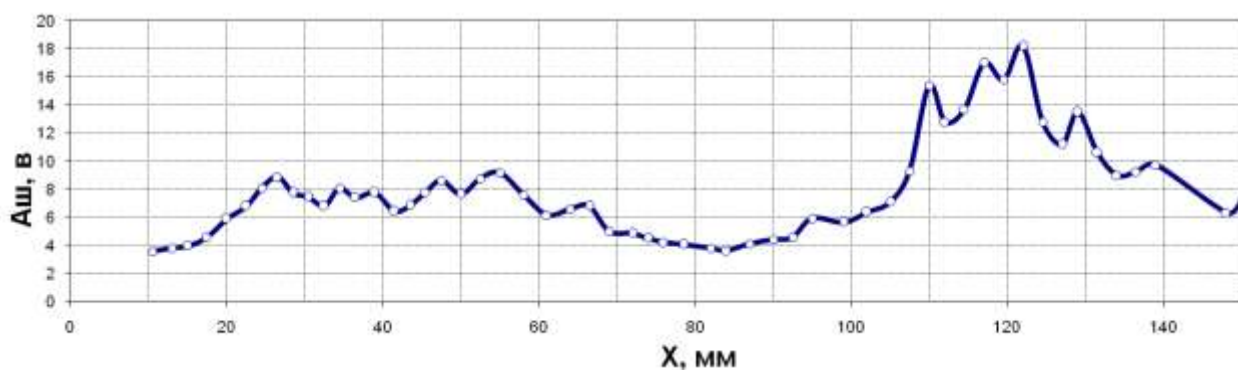


Рис. 6. Продольный разрез интенсивности кавитационного шума на частоте 1070 кГц

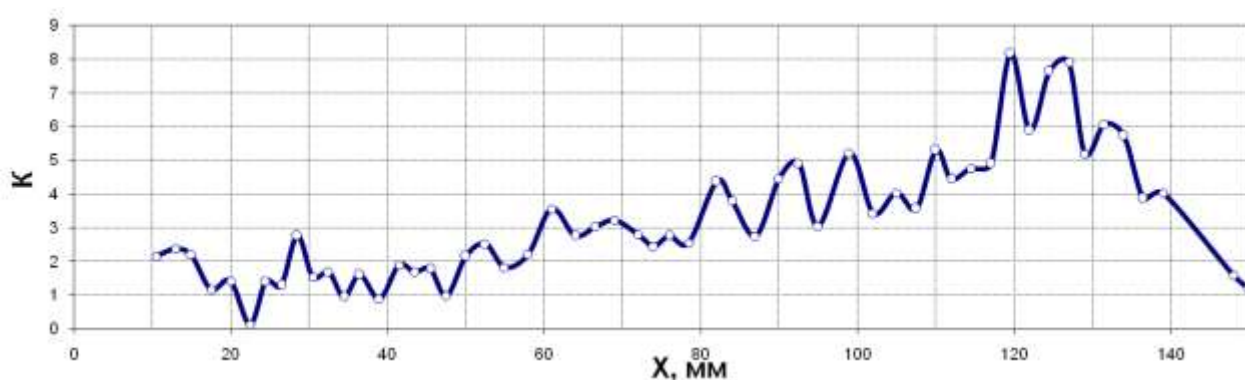


Рис. 7. Продольный разрез коэффициента ослабления пробной волны на частоте 1070 кГц

Как известно, интенсивная кавитация протекает с образованием пузырьков достаточно большого размера, вызванных процессом дегазации жидкости, при определенных условиях эти пузыри начинают всплывать. В стоячей волне начало кавитации естественно ожидать в пучностях поля, поэтому можно надеяться увидеть всплывающие пузырьки именно из этих областей. С этой целью установка оборудовалась плоским плексигласовым экраном, под которым удерживались всплывающие пузырьки. Наблюдалось всплытие пузырьков непрерывным потоком, налипая на экране, они образовывали области с периодом 4,6 мм, соответствующем периоду стоячей волны. Области представляли собой полосы состоящие из пузырьков различного размера (рис. 8).



Рис. 8. Фото всплывающих пузырьков из областей кавитации  
Распределение пузырьков в протоочном акустическом резонаторе

Известно, что на пузырек радиуса  $R$ , находящийся в звуковом поле, действует акустическая радиационная сила, обусловленная градиентом интенсивности поля. Эта сила обеспечивает движение пузырьков в акустических полях. В предположении малости монопольных колебаний пузырька в акустическом поле ( $\Delta R \ll R_0$ ,  $\Delta R = R - R_0$ ) акустическая сила записывается в виде [7]

$$\vec{F}_{\text{ак}} = -\frac{4\pi}{3} R_0^3 \left( 1 - \frac{3p}{\rho R_0^2 (\omega^2 - \omega_0^2)} \right) \cdot \nabla p, \quad (1)$$

где  $p$  – акустическое давление;  $\omega_0$  – резонансная частота малых монопольных колебаний пузырька радиуса  $R_0$ ;  $\rho$  – плотность жидкости.

Пусть в плоском резонаторе длиной  $L$  с акустически абсолютно жёсткими стенками возбуждается стоячая звуковая волна. Будем считать, что через резонатор прогоняется поток жидкости с постоянной скоростью  $V$ , направленной вдоль оси  $x$  (рис. 9).

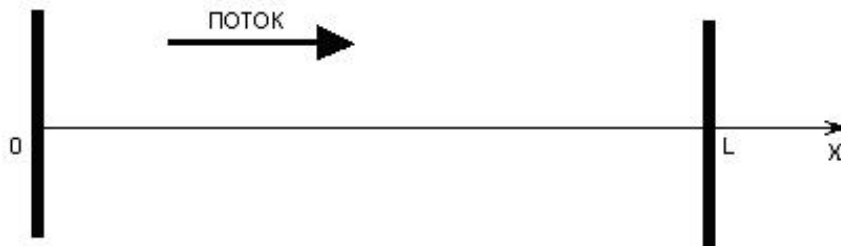


Рис. 9. Схема задачи

На пузырек, находящийся в потоке жидкости, действуют две силы: акустическая радиационная сила со стороны поля и гидродинамическая – со стороны потока жидкости (силой Архимеда и силой тяжести пренебрегаем). Гидродинамическая сила со стороны потока при малых числах Рейнольдса имеет следующий вид [12]:

$$F_{\text{гид}} = 6\pi R_0 \eta (V - V_n), \quad (\text{Re} = \rho |V - V_n| R_0 / \eta \ll 1), \quad (2)$$

где  $V_n$  – скорость пузырька;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

Рассмотрим случай, когда сила со стороны потока превышает радиационную силу со стороны акустического поля. При этом условии газовый пузырёк будет совершать движение вдоль оси резонатора. Тогда уравнение движения пузырька принимает вид

$$m a = F_{\text{гид}} + F_{\text{ак}}.$$

где  $m = 2/3 \rho \pi R_0^3$  – присоединенная масса для поступательного движения пузырька.

Подставив выражения для акустической и гидродинамической сил, действующих на пузырек, запишем уравнение движения газового пузырька в проточном резонаторе:

$$\ddot{x} = \frac{6\pi R_0 \eta}{m} (V - \dot{x}) - \frac{4\pi}{3} R_0^3 \left( 1 - \frac{3p}{\rho R_0^2 (\omega^2 - \omega_0^2)} \right) \cdot \nabla p, \quad (3)$$

где  $x$  – координата движения пузырька.

Уравнение движения пузырька (3) рассчитывалось численными способами с применением метода Рунге-Кутты 4-го порядка для системы линейных уравнений первого порядка.

С помощью данного метода были получены траектории пузырьков при их движении вдоль оси резонатора (рис. 10).

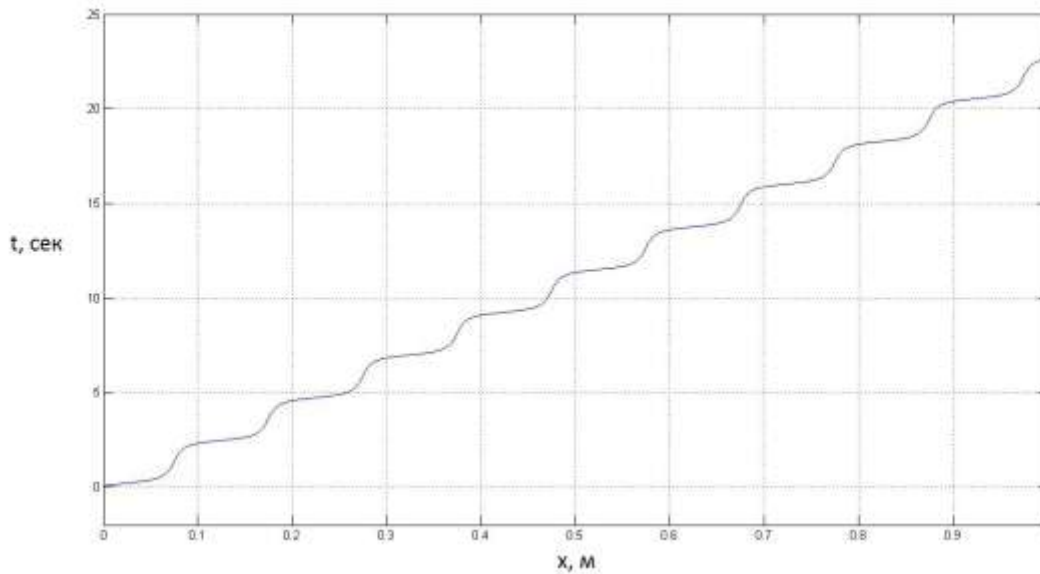


Рис. 10. Характерная траектория пузырька в поле стоячей волны резонатора

Теперь допустим, что в резонатор через определенный период времени запускается не один, а множество пузырьков. В зависимости от соотношения между акустической и гидродинамической сил в резонаторе будет происходить группировка (увеличение концентрации) пузырьков либо дегруппировка (разрежение, уменьшение концентрации). Для описания данного явления удобно воспользоваться понятием функции группировки, характеризующей изменение расстояния между двумя пузырьками при движении вдоль резонатора:

$$f(t, x_0) = \frac{dx_n}{dx_0} = \frac{dx_n}{dx_0} \frac{dt}{dt} = \frac{dx_n}{dt} \frac{1}{V_n(x=0)}. \tag{4}$$

При  $f < 1$  – происходит группировка пузырьков, при  $f > 1$  – дегруппировка пузырьков.

Используя понятие функции группировки  $f(x,t)$ , можно выразить изменение концентрации пузырьков вдоль движения резонатора в зависимости от соотношения акустической и гидродинамической сил, действующих на газовый пузырек в проточном резонаторе:

$$n(x) = \frac{n_0}{f(t, x_0)} = \frac{n_0}{1 + \bar{\xi} \text{grad}|p|^2}, \tag{5}$$

где  $\bar{\xi} = \bar{A}/\alpha V$  – отношение амплитуд акустической и гидродинамической сил. При выводе выражения для взаимосвязи концентрации пузырьков и функции группировки делалось несколько предположений: что пузырьки вводятся в резонатор равномерно, отсутствует разброс пузырьков по размерам, поле в резонаторе имеет вид чисто стоячей волны.

Интересно рассмотреть случай, когда приведенные условия не выполняются. Если данные условия не выполняются, возникает вопрос о правомерности использования функции группировки для описания изменения концентрации пузырьков. Учтем неравномерность ввода пузырьков в резонатор. До этого предполагалось, что пузырьки равномерно, со строго определенным периодом поступают в резонатор. Теперь допустим, что время ввода пузырька представляет собой равномерный период со случайной добавкой, распределенной по нормальному закону с некоторым разбросом по времени:

$$t_{\text{ввода}} = n dt + dt_{\text{случ}}. \tag{6}$$

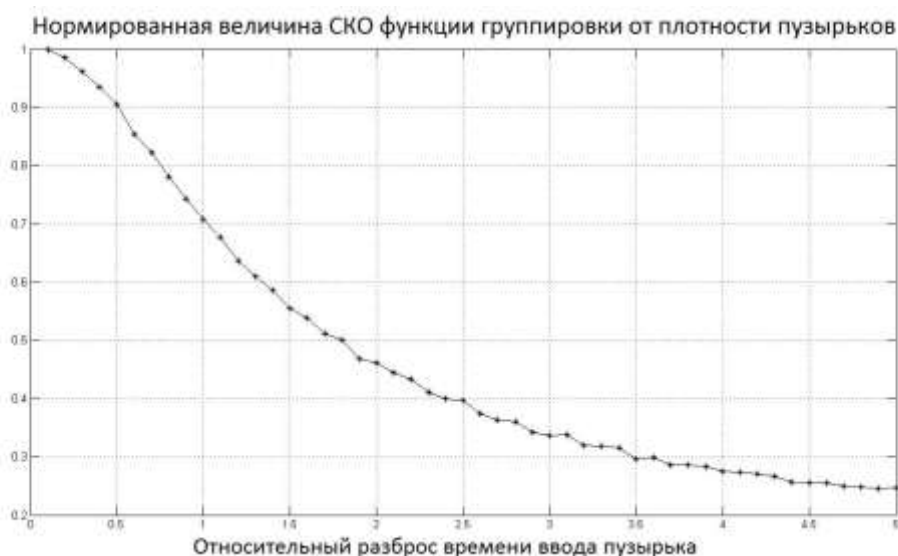
Численными методами были рассмотрены случаи группировки пузырьков при повышении относительного разброса времени ввода:

$$\sigma_{dt\text{случ}}/dt. \quad (7)$$

Для описания характерного отклонения концентрации пузырьков от функции группировки использовалась нормированная величина среднеквадратичного отклонения (СКО) между производной от траектории пузырька по координате и найденной численными методами концентрацией пузырьков в резонаторе. СКО усреднялась по нескольким реализациям:

$$A_{\text{норм}} / \left\langle \sqrt{\sum_i (n(x_i) - \alpha \frac{dx_i}{dt})^2} \right\rangle. \quad (8)$$

На рис. 11 представлена зависимость величины СКО между производной от траектории и концентрацией пузырька (8) от относительного разброса времени ввода пузырька в резонатор (7).



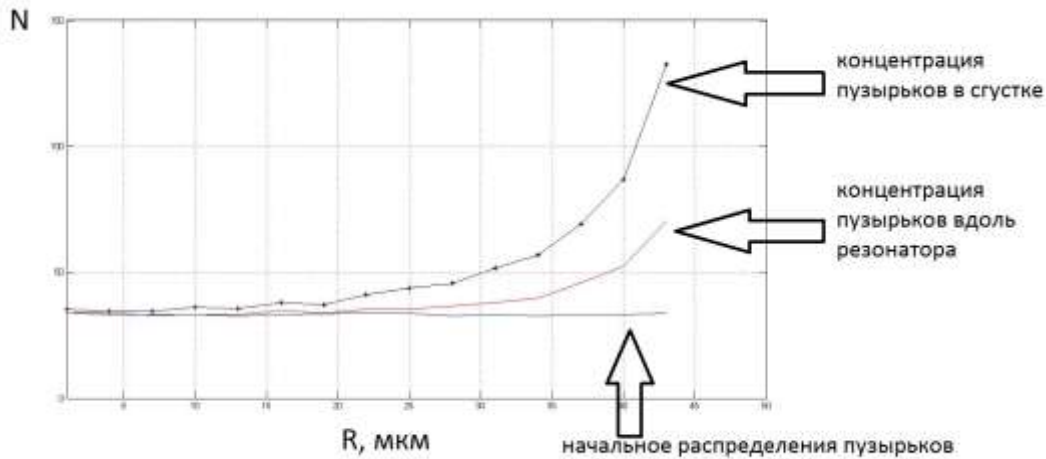
**Рис. 11. Нормированная величина СКО между функцией группировки и плотностью пузырьков**

Из рис. 11 видно, что приемлемый случайный разброс времени ввода пузырька в резонатор не должен превышать 0,5 от величины самого периода ввода. При данных условиях представляется возможным применять понятие функции группировки для описания изменения концентрации пузырьков в резонаторе.

Далее учтем разброс вводимых в резонатор пузырьков по размерам. Предположим, что функция распределения пузырьков по размерам имеет вид  $R^{-3}$ . Численный расчет показал, что если все резонансные частоты пузырьков  $\omega_0$  лежат выше частоты звуковой волны в резонаторе, т.е.  $\omega \ll \omega_0$ , то разброс пузырьков по размерам не влияет на изменение группировки пузырьков в резонаторе.

Однако численными методами был подтвержден другой интересный эффект. Наличие разброса пузырьков по размерам отражается на изменении траектории пузырьков. Чем больше пузырек, тем сильнее на него воздействует радиационная сила со стороны акустического поля и тем сильнее он задерживается в резонаторе. Это обстоятельство свидетельствует о «селективном» свойстве акустического проточного резонатора с пузырьками: относительная доля пузырьков большего размера в резонаторе повышается по отношению к их начальному распределению на входе резонатора. На рис. 12 данный эффект проиллюстрирован для случая равномерного распределения пузырьков по размерам на входе резонатора.

Явным образом видно изменение концентрации пузырьков больших размеров в сечении резонатора по сравнению с их начальным распределением на входе резонатора. Наиболее сильно данный эффект проявляется в местах сгущений пузырьков, так как в данной области воздействие акустической силы на пузырек максимально. В итоге, доля пузырьков больших размеров в сгустке повышается.



**Рис. 12.** «Избирательный» эффект проточного резонатора. Эффект заметным образом усиливается в местах сгущений пузырьков

### Выводы

Таким образом, разработанная установка позволила исследовать структуру поля в резонаторе. Изучено влияние акустической кавитации на структуру стоячей волны. Проведенное экспериментальное исследование кавитации в открытом плоском акустическом резонаторе показало, что кавитация возникает сначала в пучностях стоячей волны, а по мере увеличения накачки и развития кавитационного процесса постепенно разрушается структура стоячей волны. По измерению ослабления пробного акустического пучка, проходящего через кавитирующую область, а также по интенсивности кавитационного шума получено пространственное распределение интенсивности кавитации на различных стадиях ее развития. Теоретически рассмотрена задача о распределении концентрации пузырьков в проточном акустическом резонаторе. Показано, что в нем сохраняется периодическая структура концентрации пузырьков. Выявлен эффект «затягивания» больших пузырьков в проточном резонаторе: относительная доля пузырьков большего размера в резонаторе повышается по отношению к их начальному распределению на входе резонатора.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (контракт № 02.740.11.0565), грантов РФФИ № 11-02-00774 и государственной поддержке ведущих научных школ НШ-3700.2010.2.

### Библиографический список

1. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968.
2. Перник, А.Д. Проблемы кавитации / А.Д. Перник. – Л.: Судостроение, 1966.
3. Рождественский, В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977.
4. Федоткин, И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.
5. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 789 с.



6. **Сиротюк, М.Г.** Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. – М.: Наука, 2008.
7. **Leighton, T.G.** The acoustic bubble / T.G. Leighton. – London: Academic Press, 1994. – 613 p.
8. **Lauterborn, W.** *Adv. Chem. Phys* / W. Lauterborn, T. Kurz, R. Mettin, C.D. Ohl. 1999. Vol. 110. Pp. 295–380.
9. **Greenland, P.T.** // *Contemp. Phys.* 1999. Vol. 40. P. 11–30.
10. **Wu, C.C.** // *Phys. Rev. Lett* / C.C. Wu, P.H. Roberts. 1993. Vol. 70. P. 3424.
11. **Goldberg, B.B.** *Ultrasound Med. Biol* / B.B. Goldberg, J.B. Liu, F. Forsberg. 1994. Vol. 20. P. 319–325.
12. **Ландау, Л.Д.** Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

*Дата поступления  
в редакцию 14.10.2011*

**I.N. Didenkulov, A.I. Martyanov, N.V. Pronchatov-Rubtsov, V.A Tikhonov**

### **STUDY A CAVITATION IN A PLANE ACOUSTIC RESONATOR**

Results of experimental investigation of acoustic cavitation in a plane open resonator are given. Measurements of the intensity of cavitation noise at different regimes of the pump field were done. It was theoretically considered features of bubble distribution in a resonator with current of fluid.

*Key words:* cavitation, plane resonator, bubbles, noise, measurements, current of liquid, bubble grouping.