ISSN: 1999-6691, e-ISSN: 2782-3709 DOI: http://doi.org/10.7242/1999-6691/2025.18.1.6

Научная статья

Распределения акустического давления и зон кавитационной активности в жидкости: численное моделирование и эксперимент

***И.О. Сбоев*[1], *Т.П. Любимова*[2], *М.О. Кучинский*[2], *К.А. Рыбкин*[3]**

[1] *АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Российская Федерация*
[2] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*
[3] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация*

Одним из направлений изучения физико-химических процессов, происходящих в жидкости под действием высокочастотных звуковых колебаний (ультразвука), является определение роли акустической кавитации. Ее возникновение обусловлено неоднородностью акустического давления, создаваемого волнами от источника ультразвука (излучателя). Основная задача настоящей работы заключается в численном исследовании в пакете COMSOL Multiphysics трехмерного стационарного распределения акустического давления в рабочей области, заполненной жидкостью с заданными физико-химическими свойствами. Совместно с вычислительными экспериментами проводится натурное установление расположения зон кавитационной активности методом foil test, результаты которого оцениваются путем сравнения со структурой рассчитанного внутри рабочей полости звукового поля. В рамках разрабатываемой численной модели для простоты рассматриваются стоячие ультразвуковые волны. Используются две формы расчетной области – прямой круговой цилиндр и прямоугольный параллелепипед. Анализируется стационарное распределение акустического давления над круглым излучателем. Полагается, что ультразвуковые стоячие волны распространяются в жидкой среде, которая сжимаема, при этом диссипация звуковой энергии при наличии вязкого трения и образовании парогазовых пузырьков в жидкости не учитывается. На верхней и боковой границах рабочей полости задается либо нулевое давление, либо условие импеданса. Исследуется распределение акустического давления, возникающего в жидкости под воздействием стоячей ультразвуковой волны при резонансных и нерезонансных частотах излучателя. Выполняется сопоставление распределения акустического давления в центральном сечении рабочей полости с фотографиями алюминиевой фольги, полученными в натурном эксперименте.

Ключевые слова: ультразвуковая стоячая волна, акустическая кавитация, метод foil test, кавитационная активность, акустическое давление, численное моделирование, программный пакет COMSOL Multiphysics

Получение: 25.11.2024 / *Публикация онлайн*: 10.04.2025 УДК 519.673, 620.17

1. Введение

Распространение высокочастотных звуковых колебаний (ультразвуковых волн) способно приводить к перераспределению давления внутри ограниченного объема жидкости. При некоторых условиях в жидкости может появляться акустическая кавитация, которая, как правило, сопровождается образованием парогазовых пузырьков из зародышей кавитации (в реальных жидкостях — это примеси или включения) с их последующим расширением, сжатием и коллапсом (схлопыванием) [1–4]. Таким образом, необходимым, но не достаточным условием возникновения в жидкости акустической кавитации и кавитационной активности является создание ультразвуковой волны определенной амплитуды или превышение порога кавитации [5–7]. Кроме того, существует нелинейная зависимость между частотой ультразвуковой волны и пороговым давлением, при котором возникает кавитационная активность [8]. Часто в результате нарушения сплошности в присутствии ультразвуковых волн в жидкости образуются так называемые кавитационные зоны или каверны, заполненные парогазовыми пузырьками. В работах [9, 10] отмечается, что парогазовые пузырьки под действием силы акустического излучения, известной как сила Бьеркнеса, схлопываются в узлах стоячей ультразвуковой волны, в которых перепад давления может достигать экстремальных значений. В свою очередь расположение узлов стоячей ультразвуковой волны зависит от свойств среды, в которой распространяется волна, а также от геометрии рабочей полости, частоты и мощности излучателя.

Результаты исследований, посвященных практическим вопросам акустической кавитации, находят применение при проектировании различных устройств, таких как ультразвуковые ванны (для очистки поверхностей), флотационные машины (для разделения взвешенных в жидкости небольших твердых частиц), а также используются при разработке камер сонохимических реакторов (для физико-химической обработки жидкостей и коллоидных растворов, интенсификации физических и химических процессов). Наибольший интерес представляют именно задачи, связанные с интенсификацией процессов синтеза, экстракции и разделения различных веществ благодаря воздействию кавитации [11–13], а также флотационные процессы [14–17]. При решении подобных задач возникает необходимость изучения как структуры ультразвукового поля, так и характера расположения в жидкости зон кавитационной активности. На распределение акустического давления от ультразвуковой волны и расположение кавитационных зон, как правило, влияют следующие факторы: условия создания ультразвуковых волн, геометрия рабочей полости, физико-химические свойства жидкости и наличие в ней различных примесей [18, 19].

При экспериментальном анализе кавитационной активности важнейшими и трудоемкими задачами являются разработка и усовершенствование методов визуализации акустических полей, а также измерение характеристик ультразвуковых волн вблизи кавитационных зон [10, 20]. Наблюдение и систематическое изучение механизмов образования зон активной кавитации зачастую требует больших затрат и создания особых условий для минимизации влияния измерительного оборудования и внешних факторов на структуру звукового поля и

©Авторы 2025 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

физико-химические свойства используемой жидкости. Оптимальным подходом к исследованию распределения акустического давления в жидкости служит численное моделирование, которое позволяет более наглядно представлять структуру звукового поля в рабочей полости с произвольной геометрией и оценивать влияние изменения различных параметров на рассматриваемую систему [21–23]. В свою очередь одна из основных проблем численного моделирования заключается в необходимости учета динамики многочисленных парогазовых пузырьков в жидкости и связанную с их появлением диссипацию энергии ультразвуковых волн. В настоящее время широкое распространение для этого получили модели пузырьковой среды [24, 25].

Цель настоящей работы состоит в следующем:

– создание и верификация конечно-элементной модели;

– исследование на ее основе распределения акустического давления в объеме жидкости в условиях ультразвуковых колебаний;

– изучение влияния граничных условий и рабочей частоты излучателя на структуру стоячей ультразвуковой волны в жидкости;

– сравнение распределений акустического давления, установленных при численном моделировании и в натурных экспериментах методом foil test [26], позволяющим определять зоны кавитационной активности, наблюдаемые как эрозия (разрушение) алюминиевой фольги.

2. Описание математической постановки задачи

2.1. Геометрия расчетной области и основные уравнения

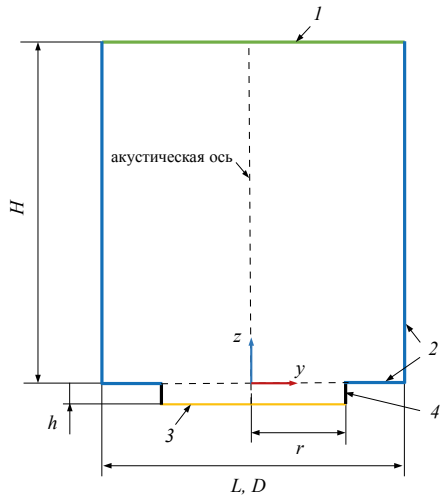


Рис. 1. Схема расчетной области: верхняя граница (*1*), боковая и нижняя (вне излучателя) границы (*2*), рабочая поверхность излучателя (*3*), боковая граница излучателя (*4*)

Итак, с применением программного пакета COMSOL Multiphysics численно исследуется структура стоячей ультразвуковой волны внутри прямого кругового цилиндра с параметрами, соответствующими рабочей полости из работы [27], и прямоугольного параллелепипеда, используемого в работах [5, 28]. Обобщенная схема расчетной области приведена на рисунке 1.

Распространение ультразвуковых волн в рабочей полости в форме прямого кругового цилиндра диаметром D и высотой H определяется как в осесимметричной (ось симметрии совпадает с акустической осью излучателя), так и в трехмерной постановке. Для прямоугольного параллелепипеда квадратного сечения со сторонами L и высотой H моделирование стоячей ультразвуковой волны выполняется только в трехмерной постановке. Размеры рабочих областей приведены в таблице 1.

При стандартном подходе к решению акустических задач рассматриваются малые изменения акустического давления относительно начального значения p_0, отвечающего стационарному состоянию объекта исследования. Распространение звуковых волн в потоке сжимаемой жидкости без диссипации энергии (без теплопроводности и вязкости) описывается уравнениями:

– переноса импульса (уравнение Эйлера)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}+(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}=-\frac{1}{\rho}\nabla p; \tag{1}$$

– неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\mathbf{u})=0. \tag{2}$$

В уравнениях (1) и (2) приняты обозначения: $\rho(t)=\rho_0+\rho'(t)$ — плотность жидкости; $p(t)=p_0+p'(t)$ — полное акустическое давление; $\mathbf{u}(t)=\mathbf{u}_0+\mathbf{u}'(t)$ — полное поле скорости, где переменные $\rho'(t), p'(t)$ и $\mathbf{u}'(t)$ представляют собой малые отклонения соответствующих величин:

$$\rho'(t)\ll\rho_0,\quad p'\ll p_0,\quad \mathbf{u}'\ll\mathbf{u}_0.$$

Таблица 1. Формы рабочей полости и размеры

Форма рабочей полости	D, мм	H, мм			L, мм
Прямой круговой цилиндр	80	107			–
	120	80	94	107	–
Прямоугольный параллелепипед	–	140			109

После подстановки выражений для $\rho(t)$, $p(t)$ и $\mathbf{u}(t)$ в уравнения (1) и (2) и оставления только линейных по $\rho'(t)$, $p'(t)$ и $\mathbf{u}'(t)$ членов исходные уравнения приобретают вид:

$$\frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0}\nabla p', \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0(\nabla \cdot \mathbf{u}') = 0. \tag{4}$$

В рамках линеаризации уравнений (3) и (4) величина $\rho'(t)$ может быть выражена через давление $p'(t)$ с использованием разложения Тейлора:

$$\rho' = \frac{\partial \rho_0}{\partial p}\bigg|_S p' = \frac{1}{c_S^2}p', \tag{5}$$

где параметр c_S обозначает скорость звука в жидкости при постоянной энтропии S. В дальнейшем нижние индексы S и 0 в уравнениях опускаются.

Применяя уравнение переноса импульса (3) и уравнение неразрывности (4) и отбрасывая штрихи в обозначениях $\rho'(t)$ и $p'(t)$, можно записать волновое уравнение для распространения звуковых волн в жидкости без затухания в виде уравнения Гельмгольца:

$$\frac{1}{\rho c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho}(\nabla p)\right) = 0. \tag{6}$$

Решением уравнения (6) является гармоническая по времени звуковая волна, изменение акустического давления от действия которой описывается следующим образом:

$$p(\mathbf{r},t) = p(\mathbf{r})e^{i\omega t}, \tag{7}$$

где давление на расстоянии $\mathbf{r} = \mathbf{r}\{x,y,z\}$ от излучателя изменяется с круговой частотой $\omega = 2\pi f$ при линейной частоте колебаний f излучателя (его рабочей частоте).

Для упрощения расчетов вычислительные эксперименты выполняются на основе стационарного волнового уравнения Гельмгольца без учета акустических явлений, обусловленных течением жидкости:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho}(\nabla p)\right) + \frac{\omega^2}{\rho c^2}p = 0. \tag{8}$$

Решение задачи в частотной области позволяет использовать преобразование Фурье для представления дифференциального волнового уравнения (8) в алгебраическом виде. В рамках частотного анализа звуковая волна разбивается на составляющие гармоники — синусоидальные волны с различной амплитудой и фазой. При этом считается, что акустическое давление в жидкости описывается как $p(\mathbf{r}) \sim e^{i(\omega/c)\mathbf{r}}$, таким образом, в частотной области создается возможность исследовать амплитуду давления в зависимости от частоты, а не от времени.

При численном исследовании рассматриваются излучатели с рабочей частотой f от 10.7 до 29.5 кГц (нижней границы ультразвука). Источником ультразвуковых волн является поверхность круглого излучателя радиусом $r_1 = 30$ мм [27] и $r_2 = 44$ мм [10, 28], находящаяся в контакте с нижней границей рабочей полости. В трехмерной постановке моделируется излучатель с конечной толщиной $h = 1$ мм.

Исследуемой жидкостью служит сжимаемая среда со свойствами воды (плотность $\rho = 1.0 \times 10^3$ кг/м^3, скорость звука $c = 1.5 \times 10^3$ м/с) без учета теплопроводности в нормальных условиях (при постоянной температуре $T_0 = 293$ К и давлении $p = p_a$, где $p_a = 1.01 \times 10^5$ Па — атмосферное давление). Также предполагается отсутствие примесей и диссипации энергии за счет внутреннего трения. Кроме этого, не учитывается зарождение и развитие кавитационных парогазовых пузырьков, то есть жидкость считается однородной и однофазной [29].

При распространении ультразвуковых волн жидкость остается неподвижной ($\mathbf{u}_0 = 0$). Для простоты начальное давление принимается равным $p_0 = 0$ (вместо $p = p_a$). В таком случае полное акустическое давление p в каждой точке расчетной полости в числовом выражении равно перепаду давления в этой точке.

2.2. Описание граничных условий

На стенках расчетной области и на рабочей поверхности излучателя (Рис. 1) выполняются следующие далее условия.

На верхней границе $z = H$ (поверхность *1*), на боковых границах рабочей полости в форме прямого кругового цилиндра $x^2 + y^2 = (D/2)^2$ и прямоугольного параллелепипеда $x = \pm L/2$, $y = \pm L/2$, а также на нижней границе $z = 0$ (поверхности *2*) рассматриваются граничные условия двух типов: 1) мягкая звуконепроницаемая граница, для которой выполняется условие Дирихле, обозначающее отсутствие полного акустического давления

$$p = 0, \tag{9}$$

которое соответствует сдвигу фазы звуковой волны на 180° при идеальном отражении от поверхности, на которой давление обращается в нуль [29]; 2) условие акустического импеданса (только для прямоугольного параллелепипеда), которое учитывает связь давления и нормальной скорости частиц жидкости в ультразвуковом поле

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = -\frac{i\omega}{Z_{1,2}}p, \tag{10}$$

где $\mathbf{n}$ — вектор нормали к боковой поверхности расчетной области, то есть предполагается, что характер взаимодействия поверхности и падающей звуковой волны определяется соотношением акустических импедансов жидкости и границ. В данной работе рассматривается рабочая полость с боковыми границами, которые характеризуются импедансом: $Z_1 = \rho_1 c_1$, где $\rho_1 = 2.6 \times 10^3$ кг/м^3 — плотность кварцевого стекла, $c_1 = 5.57 \times 10^3$ м/с — скорость звука для продольной волны в кварцевом стекле. Для верхней границы, являющейся границей раздела «вода–воздух», задается акустический импеданс $Z_2 = \rho_2 c_2$, где $\rho_2 = 1.2$ кг/м^3 — плотность воздуха, $c_2 = 3.4 \times 10^2$ м/с — скорость звука в воздухе при нормальных условиях.

На рабочей поверхности излучателя $z = -h$ (поверхность *3*) мощность излучения P_{US} ультразвуковых волн связана с интенсивностью I_{US} колебаний следующим образом [25, 30]:

$$P_{US} = I_{US}\, s. \tag{11}$$

При этом принимается, что колебания рабочей поверхности излучателя полностью передаются жидкости через границу контакта площадью $s = \pi r^2$. Интенсивность I_{US} в свою очередь определяется величиной давления p_{us} (согласно условию Дирихле), которое рабочая поверхность излучателя оказывает на слой жидкости:

$$I_{US} = \frac{p_{us}^2}{2\rho c}. \tag{12}$$

Здесь давление p_{us} выступает в качестве управляющего параметра, который в рамках численной модели подбирается таким образом, чтобы мощность излучателя соответствовала экспериментальным условиям, описанным в работах [10, 28].

Необходимо отметить, что иногда (см., например, [27, 31]) интенсивность колебаний рабочей поверхности излучателя характеризуется амплитудой скорости $u = \omega A$, где A — максимальное смещение рабочей поверхности излучателя (амплитуда колебаний). В таком случае роль управляющего параметра выполняет амплитуда колебаний A, которую следует предварительно измерить в натурном эксперименте.

Боковая поверхность круглого излучателя $x^2 + y^2 = r^2$ (поверхность *4*) предполагается жесткой и звуконепроницаемой; на ней выполняется условие Неймана, обозначающее отсутствие нормальной производной акустического давления p:

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0. \tag{13}$$

При заданном условии коэффициент отражения на боковой границе равняется единице (полное отражение), что соответствует поверхности с бесконечно большим акустическим импедансом.

2.3. Расчетная сетка

Для решения в частотной области волнового уравнения Гельмгольца (8) используется неструктурированная расчетная сетка с элементами в виде треугольников (в осесимметричной двухмерной постановке) и тетраэдров (в трехмерной постановке) с узлами в их вершинах. Схематичное изображение расчетной сетки приведено на рисунке 2.

Параметрическое исследование влияния размеров элементов расчетной сетки на сходимость решения выполняется в осесимметричной и трехмерной постановке на примере прямого кругового цилиндра с приведенными

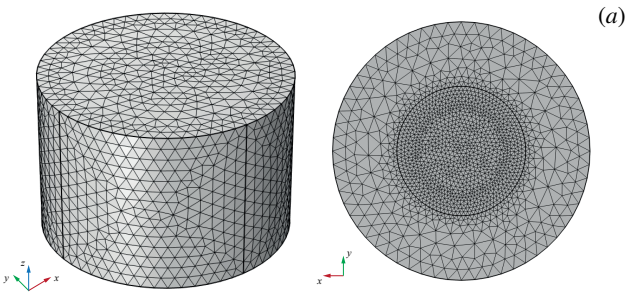


Рис. 2. Изображение неструктурированной расчетной сетки для разной формы расчетной области: прямой круговой цилиндр (*а*) и прямоугольный параллелепипед (*б*)

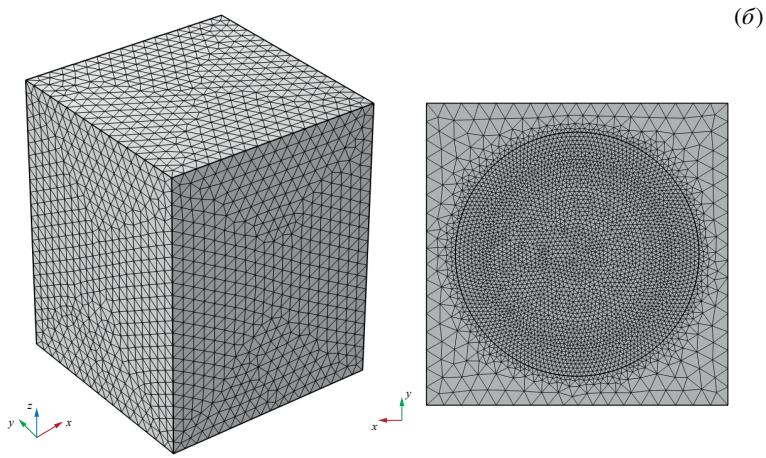


Рис. 2. *Продолжение*

в таблице 1 размерами. Максимальный линейный размер элемента расчетной сетки $\Delta_{\max}$ определяется исходя из числа m узлов сетки, приходящихся на длину волны λ:

$$\Delta_{\max} = \frac{\lambda}{m} = \frac{c}{f \cdot m}. \tag{14}$$

На основе тестовых расчетов акустических колебаний, генерируемых в воде круглым излучателем с рабочей частотой $f = 28.2$ кГц ($\lambda = 53.2$ мм), определено оптимальное число узлов $m = 8$, которое соответствует $\Delta_{\max} = 6.7$ мм. Минимальный размер элемента сетки выбран равным $\Delta_{\min} = 0.16$ мм. В расчете при низкочастотных колебаниях ($10.7 \leqslant f \leqslant 16.1$ кГц) число узлов увеличивалось до $m = 12$ при $7.7 \leqslant \Delta_{\max} \leqslant 11.6$ мм и $0.17 \leqslant \Delta_{\min} \leqslant 0.19$ мм соответственно. Для заданных расчетных областей общее количество элементов аппроксимирующей сетки N при выбранных m, $\Delta_{\max}$ и $\Delta_{\min}$ принимало одно из значений, которые показаны в таблице 2.

Таблица 2. Параметры излучателя, расчетной области и расчетной сетки (жидкость – вода)

Форма расчетной области и размерность задачи		f, кГц	$\lambda/4$, мм	r, мм	h, мм	L, мм	D, мм	H, мм	$N \cdot 10^{-5}$, шт.
Прямой круговой цилиндр [27]	осесимметричная постановка	28.2	13.3	30	–	–	80	107	0.00312
							120	80	0.00382
								94	0.00421
								107	0.00445
	трехмерная постановка				1	–	80	107	4.939
							120	80	7.199
								94	8.155
								107	9.039
Прямоугольный параллелепипед	трехмерная постановка	10.70	35,0	44	1	109	109	140	0.916
		13.40	27.9						1.162
		16.10	23.3						1.541
		18.75	20,0						0.912
		21.40	17.5						1.043
		24.20	15.5						1.216
		26.80	13.9						1.412
		28.00 [10]	13.4						1.528
		29.50	12.7						1.676

3. Верификация результатов численного моделирования

Для наиболее эффективного возбуждения стоячей ультразвуковой волны в ограниченном по высоте слое жидкости используется условие резонанса [32]:

$$H = (2n+1)\frac{\lambda_{2n+1}}{4} = (2n+1)\frac{c}{4f_{2n+1}}. \tag{15}$$

В слое жидкости высотой H, которая кратна нечетному числу четвертей длины волны, формируется стоячая звуковая волна с наибольшей амплитудой (в резонансных условиях перераспределение энергии в стоячей ультразвуковой волне происходит наиболее эффективно).

С другой стороны, возможна ситуация, когда высота слоя жидкости кратна четному числу четвертей длины волны:

$$H=(2n)\frac{\lambda_{2n}}{4}=(2n)\frac{c}{4f_{2n}}. \tag{16}$$

В этом случае в жидкости образуется стоячая волна с минимальной амплитудой (нерезонансные условия). В формулах (15) и (16) частоты f_3 и f_2 при $n=1$ есть первая резонансная/нерезонансная частота. Частоты f_{2n+1} и f_{2n} при $n\geqslant 2$ являются дополнительными.

Для верификации результатов численно определяется распределение акустического давления в осесимметричной и трехмерной постановках в прямом круговом цилиндре диаметром, соответственно, $D_1=80$ мм и $D_2=120$ мм и трех высотах: $H_1=80$ мм, $H_2=94$ мм и $H_3=107$ мм [27, 31]. Верхняя, нижняя и боковая границы предполагаются мягкими звуконепроницаемыми, с давлением, обращающимся на них в нуль (см. уравнение (9)). В качестве рабочей жидкости используется вода. Радиус рабочей поверхности излучателя и мощность излучения составляют: $r_1=30$ мм и $P_{US}=7$ Вт. Частота излучателя $f=28.2$ кГц соответствует длине волны в воде $\lambda=53.2$ мм. Численное моделирование выполняется без учета диссипации звуковой энергии в жидкости за счет образования пузырьков.

На рисунке 3 для сравнения расчетного распределения акустического давления $p(y,z)$ в центральном сечении цилиндра также приведены изображения участков эрозии, обусловленной действием пузырьков в жидкости на поверхность фольги, полученные в натурном эксперименте в работе [27]. Распределения акустического давления при формировании стоячей ультразвуковой волны внутри рабочей полости $D_2=120$ мм и высотой $H_1=80$ мм и $H_3=107$ мм представлены на рисунке 3*а*, *в*, при этом выбранная геометрия полости соответствует нерезонансным условиям ($H_1=6\lambda/4$ и $H_3=8\lambda/4$). Внутри рабочей полости того же диаметра, но при высоте $H_2=94$ мм

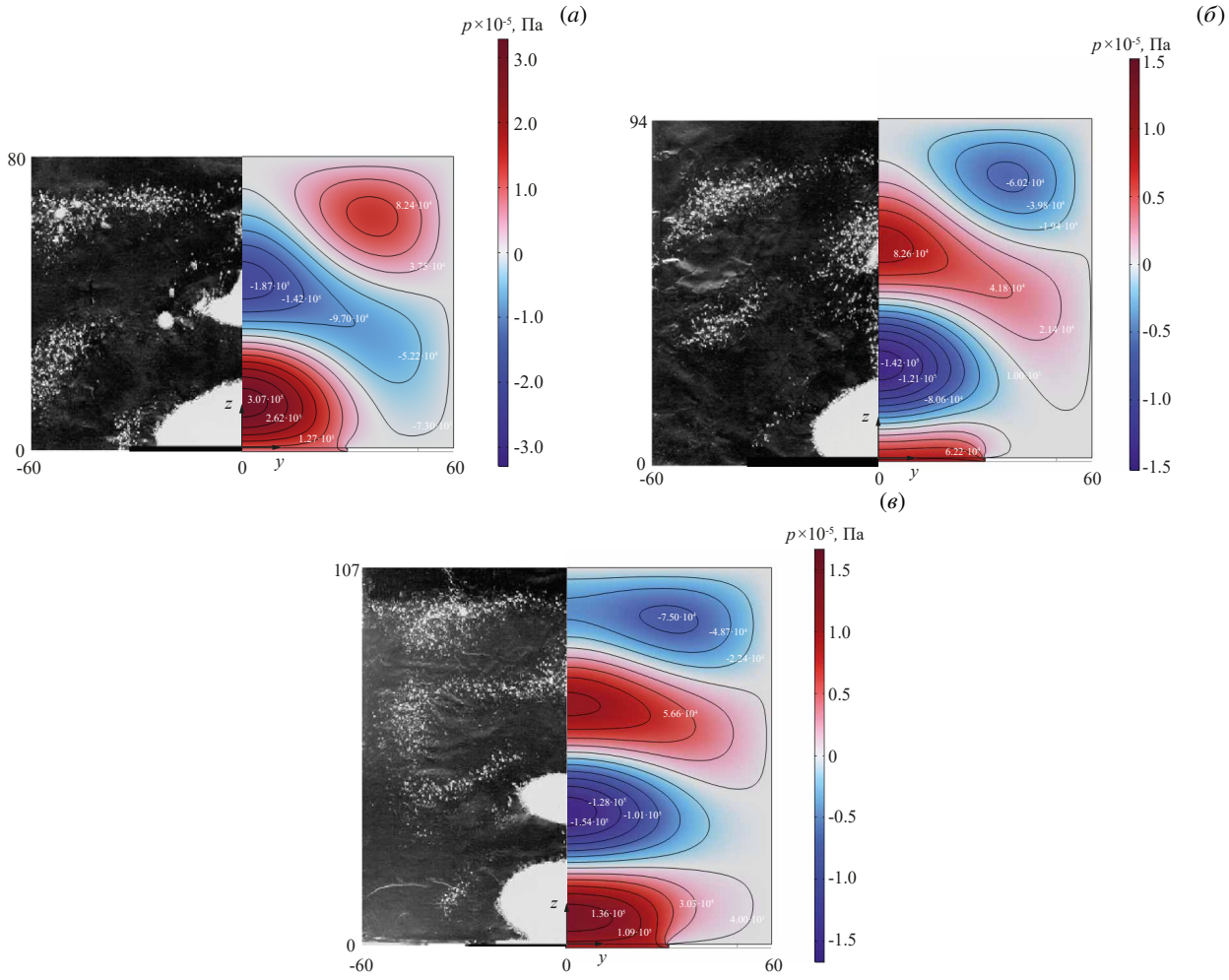


Рис. 3. Картины стационарного распределения акустического давления $p(y,z)$ в центральном сечении прямого кругового цилиндра диаметром $D_2=120$ мм и высотой в нерезонансных условиях $H_1=80$ мм, $6\lambda/4$ (*а*), в резонансных условиях, $H_2=94$ мм, $7\lambda/4$ (*б*) и в нерезонансных условиях $H_3=107$ мм, $8\lambda/4$ (*в*); на картинах справа расчет в трехмерной постановке, слева вид участков эрозии фольги согласно работе [27]

(Рис. 3*б*) также формируется стоячая ультразвуковая волна, однако в полости реализуются резонансные условия ($H_2 = 7\lambda/4$).

В каждом из рассмотренных случаев вблизи поверхности излучателя создается зона высокого давления, максимум которого располагается на акустической оси излучателя. По мере удаления от поверхности излучателя происходит перераспределение давления с формированием чередующихся кольцевых зон высокого и низкого давления. Главной особенностью распределения акустического давления $p(y,z)$, рассчитанного для цилиндра высотой $H_1 = 80$ мм, является наличие в его верхней части зоны высокого давления. С увеличением высоты (Рис. 3*б*, *в*) в верхней части создается преимущественно зона низкого давления, а зона высокого давления смещается в центральную часть объема жидкости. При этом вблизи боковых границ, которые считаются мягкими звуконепроницаемыми, давление резко падает.

Несмотря на перечисленные выше предположения об отсутствии в жидкости парогазовых пузырьков полученное в ней распределение давления, создаваемого стоячей ультразвуковой волной, качественно согласуется с результатами эксперимента [27]. Видно, что, как и в эксперименте, в расчете парогазовые пузырьки под действием акустической силы стремятся сгруппироваться в жидкости в соответствии со структурой стоячей ультразвуковой волны.

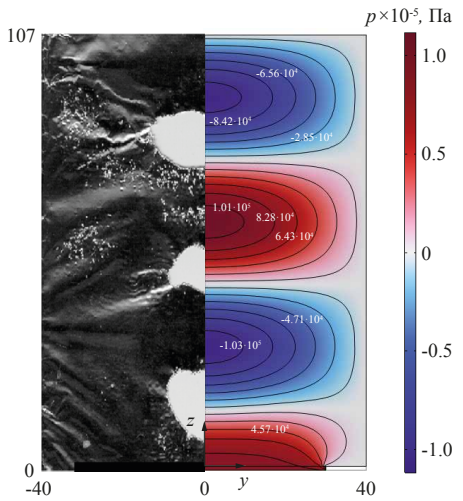


Рис. 4. Картина стационарного распределения акустического давления $p\,(y,z)$ в центральном сечении прямого кругового цилиндра при нерезонансных условиях, рассчитанная в трехмерной постановке (справа); расположение участков эрозии фольги согласно работе [27] (слева)

Зависимость структуры звукового поля от расположения пузырьков наиболее отчетливо просматривается в рабочей полости в форме прямого кругового цилиндра диаметром $D_1 = 80$ мм и высотой $H_3 = 107$ мм в нерезонансных условиях, то есть при $8\lambda/4$. В этом случае распределение акустического давления в жидкости имеет вид, показанный на рисунке 4. Образующиеся парогазовые пузырьки в основном группируются в зонах с высокими градиентами давления, вблизи узлов стоячей ультразвуковой волны (белые участки справа). В процессе схлопывания скопившихся в этих зонах парогазовых пузырьков также наблюдается локальное разрушение фольги (белые участки слева). При этом разрушение фольги отсутствует вблизи боковых границ.

Необходимо отметить, что установленные результаты не дают точного представления о формировании и развитии пузырьков в жидкости, а позволяют оценить в ней лишь интенсивность кавитационных процессов при распространении ультразвуковых волн. Тем не менее на основании полученного качественного соответствия между рассчитанным распределением акустического давления в жидкости и расположением зон кавитационной активности (Рис. 3, 4) можно сделать вывод о том, что используемая численная модель позволяет с хорошей степенью точности рассчитывать распределение давления в стоячей ультразвуковой волне при оптимальных вычислительных затратах и поэтому может применяться при исследованиях в рабочих полостях другой формы и с другими параметрами излучателя.

4. Описание методики проведения эксперимента

Для сравнения результатов численного моделирования с экспериментом в рамках настоящей работы проведена натурная визуализация активности кавитации с применением установки, описанной в работах [10, 28]. Зоны кавитационной активности оцениваются с помощью алюминиевой фольги методом foil test [10, 33]. Рабочая полость выполнена в форме параллелепипеда размерами $109\times109\times140$ мм^3. Стенки изготовлены из кварцевого стекла толщиной 3 мм. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода с температурой в диапазоне от 293 до 297 К. В эксперименте излучение ультразвуковых волн получается за счет колебаний круглой металлической пластины (излучателя) радиусом 44 мм, приводимой в контакт с пьезокерамической пластиной. Излучатель располагается вблизи нижней границы рабочей полости таким образом, чтобы центры излучателя и нижней границы совпадали. Для возбуждения колебаний пьезокерамической пластины применяется генератор мощностью 32 Вт, рабочая частота излучателя f в экспериментальной установке (28 ± 3) кГц.

5. Результаты и обсуждение

При численном моделировании распределения давления в центральном сечении рабочей полости в форме прямоугольного параллелепипеда тех же размеров ($109\times109\times140$ мм^3) в условиях стоячей ультразвуковой волны излучатель имел радиус $r_2 = 44$ мм и создавал давление на жидкость $p_{us} = 1.25p_a$. Для выбранных параметров излучателя мощность излучения, как и в эксперименте (см. раздел 4), составляла $P_{US} = 32$ Вт. В качестве рабочей жидкости использовалась вода.

Для исследования распределения давления в условиях стоячей ультразвуковой волны предварительно по формулам (15) и (16) рассчитывался спектр частот, соответствующий резонансным и нерезонансным колебаниям

[32, 34]. Вычисленные для полости высотой $H = 140$ мм значения резонансных и нерезонансных частот излучателя приведены в таблице 3. Например, для воды при $n=1$ первая резонансная частота равна $f_3=8$ кГц, нерезонансная — $f_2=5.35$ кГц. Указанные частоты оказываются намного меньше величины, отвечающей нижней границе ультразвукового диапазона, — 20 кГц, поэтому приведенные далее результаты, то есть при $2 \leqslant n \leqslant 5$, получены для рабочих частот излучателя, сопоставимых с 20 кГц.

Таблица 3. Частоты излучателя для параллелепипеда высотой $H = 140$ мм, соответствующие резонансным и нерезонансным условиям в воде

n	Резонансные условия (15)	Нерезонансные условия (16)
2	$f_5=13.4$ кГц, $\lambda_5=0.12$ м ($H=5\lambda_5/4$)	$f_4=10.7$ кГц, $\lambda_4=0.14$ м ($H=4\lambda_4/4$)
3	$f_7=18.75$ кГц, $\lambda_7=0.08$ м ($H=7\lambda_7/4$)	$f_6=16.1$ кГц, $\lambda_6=0.093$ м ($H=6\lambda_6/4$)
4	$f_9=24.2$ кГц, $\lambda_9=0.062$ м ($H=9\lambda_9/4$)	$f_8=21.4$ кГц, $\lambda_8=0.07$ м ($H=8\lambda_8/4$)
5	$f_{11}=29.5$ кГц, $\lambda_{11}=0.051$ м ($H=11\lambda_{11}/4$)	$f_{10}=26.8$ кГц, $\lambda_{10}=0.056$ м ($H=10\lambda_{10}/4$)

5.1. Распределение давления в рабочей полости с мягкими звуконепроницаемыми границами

На рисунке 5 показано распределение акустического давления $p(y,z)$ в центральном сечении параллелепипеда высотой $H = 140$ мм в условиях стоячей ультразвуковой волны при резонансных и нерезонансных рабочих частотах излучателя (см. Табл. 3) и одинаковой мощности $P_{US} = 32$ Вт. Все границы расчетной области предполагаются мягкими звуконепроницаемыми (9), поэтому акустическое давление p вблизи границ расчетной области обращается в нуль [27] (см. зоны белого цвета). О структуре стоячей ультразвуковой волны можно судить по узловым плоскостям, которые параллельны рабочей поверхности излучателя и на рисунке показаны белым цветом.

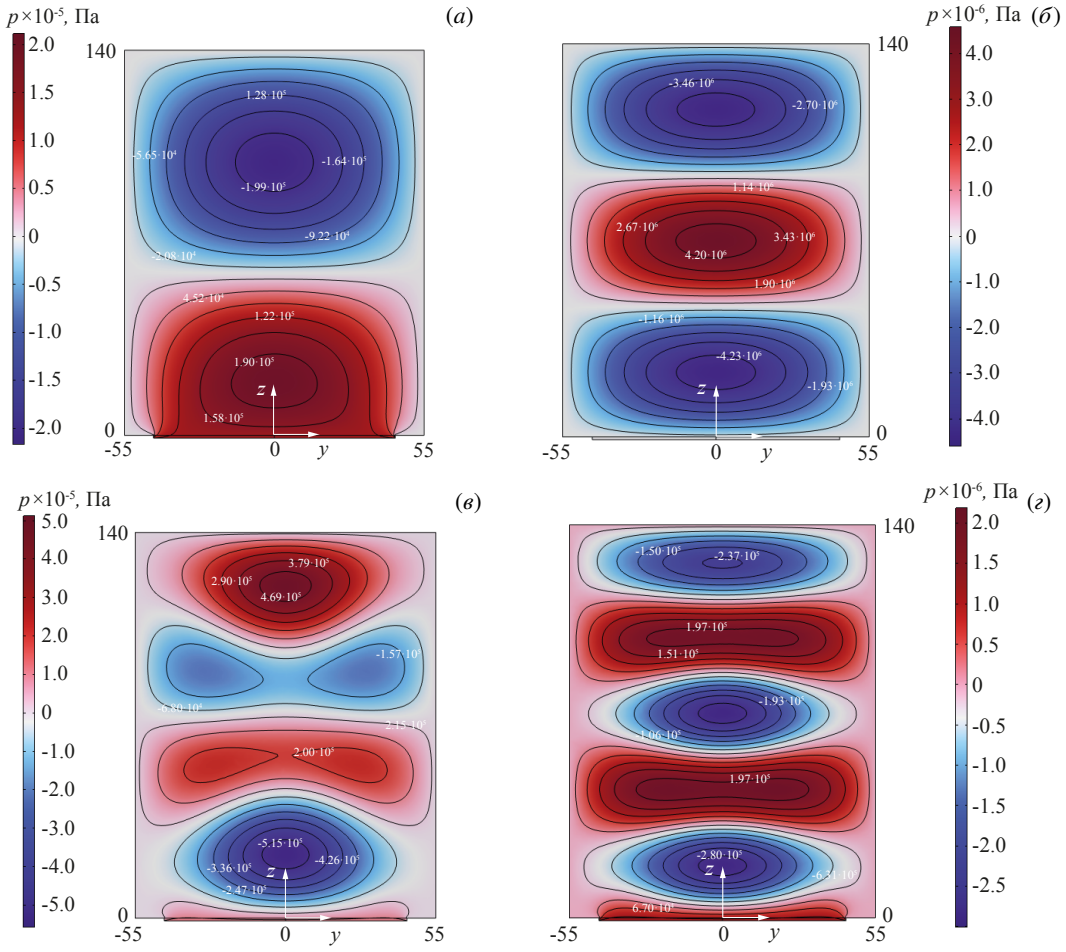


Рис. 5. Картины распределений акустического давления $p(y,z)$ в прямоугольном параллелепипеде над круглым излучателем радиусом $r_2=44$ мм при резонансных условиях: $f_5=13.4$ кГц (*а*), $f_7=18.75$ кГц (*б*), $f_9=24.2$ кГц (*в*), $f_{11}=29.5$ кГц (*г*)

Для частот $f_5 = 13.4$ кГц и $f_7 = 18.75$ кГц (для второй и третьей дополнительных частот) распределение акустического давления представляют собой набор чередующихся зон минимального и максимального давления, разделенных узловыми поверхностями. При $f_5 = 13.4$ кГц (Рис. 5*а*) по высоте расчетной области укладывается пять четвертей длины волны, при этом в центральном сечении наблюдается только одна узловая поверхность, расположенная на расстоянии 55 мм от поверхности излучателя. Ниже узловой поверхности лежит зона высокого давления, а выше — зона низкого (отрицательного) давления. При $f_7 = 18.75$ кГц (Рис. 5*б*) по высоте укладываются семь четвертей длины волны, а в центральном сечении формируется две узловые поверхности на расстоянии 48 и 90 мм от поверхности излучателя. В нижней части расчетной области и возле верхней границы формируются зоны минимального (отрицательного) давления, между которыми находится зона высокого давления.

С увеличением частоты до $f_9 = 24.2$ кГц (до четвертой дополнительной частоты) наблюдается существенное изменение распределения давления (Рис. 5*в*). Количество узловых поверхностей увеличивается до четырех. Узловые поверхности удалены на расстояние 3, 45, 75 и 95 мм от излучателя. В нижней части расчетной области формируется зона отрицательного давления, а у верхней границы — зона высокого (положительного) давления. Кроме этого, над рабочей поверхностью излучателя возникает узкая зона с отличным от нуля давлением ($p > 0$); о протяженности зоны вдоль оси z можно судить по расстоянию от поверхности излучателя до ближайшей узловой поверхности. При выбранной частоте ее протяженность не превышает 3 мм. Изменение размеров этой зоны будет заметно при дальнейшем увеличении частоты. В центральной части расчетной области при заданной частоте образуется пара зон низкого и высокого давления. Следует отметить, что при заданных условиях искривление узловых поверхностей имеет более выраженный характер, обусловленный, возможно, влиянием формы рабочей полости.

При увеличении рабочей частоты до $f_{11} = 29.5$ кГц (до пятой дополнительной частоты) число узловых поверхностей в жидкости возрастает до пяти. Они располагаются на расстоянии 5, 30, 55, 80 и 110 мм от излучателя. При этом вблизи верхней границы расчетной области так же, как и у поверхности излучателя, формируются зоны отрицательного давления (Рис. 5*г*). Вблизи поверхности излучателя образуется зона высокого давления, протяженность которой составляет 5 мм. В центральной части возникают две зоны высокого давления, между которыми располагается зона отрицательного давления. Влияние формы области исследования на форму узловых поверхностей при заданной частоте оказывается менее выраженным, чем при частоте $f_9 = 24.2$ кГц (Рис. 5*в*).

Для нерезонансных условий распределение акустического давления также представляет собой чередование зон высокого и низкого давления, число которых увеличивается с ростом рабочей частоты излучателя, однако характер их расположения отличается от рассмотренного выше резонансного случая. При $f_4 = 10.7$ кГц (при второй дополнительной частоте) в рабочей полости образуется единственная зона высокого давления (Рис. 6*а*), сопоставимая по размеру с расчетной областью. Максимальное давление достигается в ее центральной части.

При частоте $f_6 = 16.1$ кГц в параллелепипеде появляются чередующиеся зоны высокого и низкого давления, разделенные узловыми поверхностями на расстоянии 20 и 70 мм от излучателя. Над поверхностью излучателя так же, как у верхней границы, образуются зоны высокого (положительного) давления, а в центре расчетной области — зона низкого (отрицательного) давления.

С увеличением частоты излучателя f распределение давления представляет собой чередование зон высокого и низкого давления, разделенных узловыми плоскостями на расстоянии 20, 55 и 100 мм от поверхности излучателя при $f_6 = 21.4$ кГц (при четвертой дополнительной частоте, Рис. 6*в*) и 15, 50, 70 и 115 мм при $f_{10} = 26.8$ кГц (при пятой дополнительной частоте, Рис. 6*г*). В зависимости от рабочей частоты вблизи верхней границы параллелепипеда может образоваться зона высокого или низкого давления. Однако, в отличие от рассмотренных выше резонансных

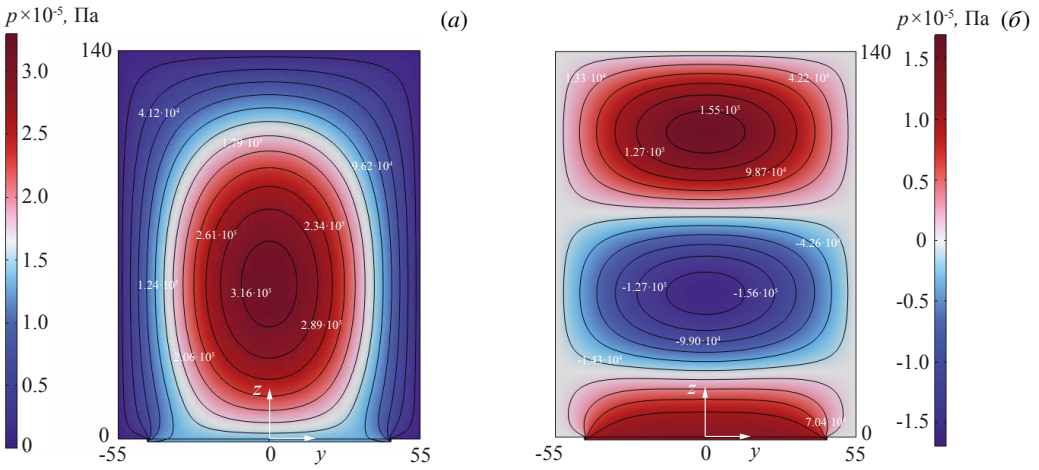


Рис. 6. Картины распределений акустического давления $p(y,z)$ в прямоугольном параллелепипеде над излучателем радиусом $r_2 = 44$ мм в рабочей полости при нерезонансных условиях: $f_4 = 10.7$ кГц (*а*), $f_6 = 16.1$ кГц (*б*), $f_8 = 21.4$ кГц (*в*), $f_{10} = 26.8$ кГц (*г*)

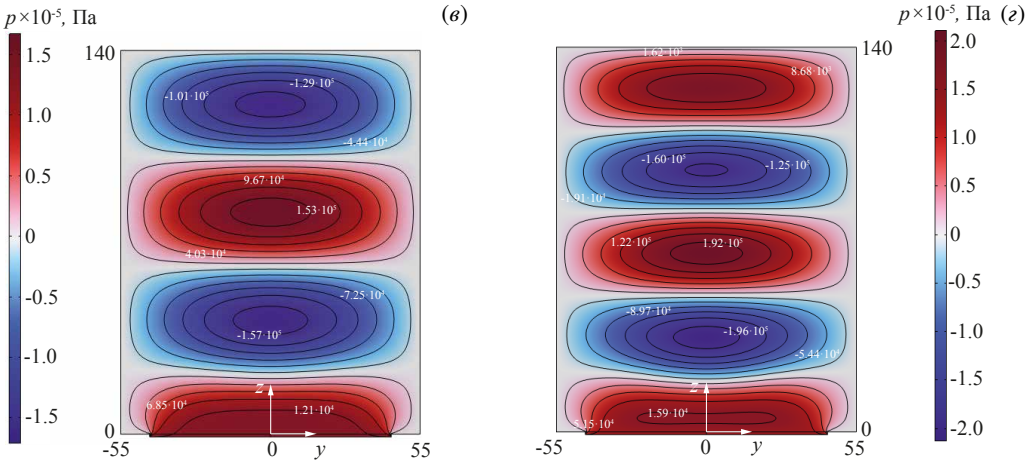


Рис. 6. *Продолжение*

условий (Рис. 5), при заданных условиях узловые поверхности в области исследования такой формы почти не искривляются, поэтому можно предположить, что распределение давления при нерезонансных частотах является менее зависимым от геометрии расчетной области. Другая особенность распределения акустического давления при нерезонансных условиях заключается в том, что вблизи поверхности излучателя для всех частот всегда имеет место зона высокого (положительного) давления.

Для резонансных и нерезонансных условий исследован профиль акустического давления $p(z)$ — его распределение вдоль акустической оси излучателя (Рис. 7). Анализ профилей показал, что для параллелепипеда высотой $H = 140$ мм с мягкими звуконепроницаемыми стенками, амплитуда колебаний давления при ультразвуковой стоячей волне и резонансных условиях ($f_7 = 18.75$ кГц) оказывается максимальной. Значит, указанная рабочая частота излучателя есть наиболее эффективная.

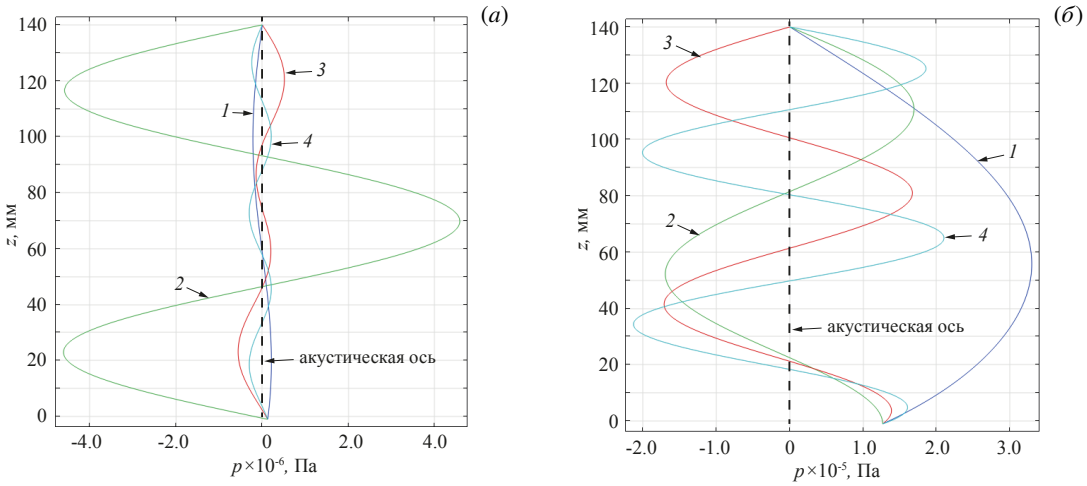


Рис. 7. Профили акустического давления $p(z)$ вдоль акустической оси излучателя в параллелепипеде с мягкими звуконепроницаемыми боковыми стенками при резонансных (*а*) ($f_5 = 13.4$ кГц (кривая *1*), $f_7 = 18.75$ кГц (*2*), $f_9 = 24.2$ кГц (*3*), $f_{11} = 29.5$ кГц (*4*)) и нерезонансных (*б*) ($f_4 = 10.7$ кГц (*1*), $f_6 = 16.1$ кГц (*2*), $f_8 = 21.4$ кГц (*3*), $f_{10} = 26.8$ кГц (*4*)) условиях

Важно отметить, что для всех резонансных рабочих частот давление вблизи поверхности излучателя оказывается близким к нулю, при этом у верхней границы оно, в силу используемых граничных условий, обращается в нуль. При нерезонансных частотах на верхней границе давление также исчезает, но вблизи поверхности излучателя его амплитуда оказывается сопоставимой с p_{us}. На основании полученных профилей $p(z)$ можно сделать вывод о расположении узловых точек на акустической оси излучателя, определить расстояние между узлами стоячей ультразвуковой волны и оценить величины максимального и минимального давления.

Таким образом, в рабочей полости с мягкими звуконепроницаемыми границами ее форма оказывает влияние на распределение давления в жидкости только при конкретной резонансной частоте (при четвертой и пятой дополнительных частотах). В остальных случаях распределение давления имеет упорядоченный вид и проявляется как чередование зон высокого и низкого давления, разделенных узловыми поверхностями.

Однако предположение о мягких звуконепроницаемых боковых границах, для которых выполняется соотношение (9), не позволяет при моделировании учитывать материал боковых границ и влияние стенок с разными

акустическими свойствами на распределение акустического давления в жидкости. Одной из характеристик, несущей в себе различия в отражательной способности боковых границ, в простейшем случае может выступать акустическое сопротивление среды или импеданс. В связи с этим при дальнейшем исследовании необходимо уточнить численную модель и ввести другие граничные условия. Здесь же при оценке влияния граничных условий рассмотрены только резонансные условия (Табл. 3).

5.2. Распределение давления в рабочей полости с твердыми боковыми границами

На рисунке 8 приведено распределение акустического давления в центральном сечении прямоугольного параллелепипеда высотой $H = 140$ мм с твердыми боковыми границами при резонансных частотах. Материалом нижней и боковой стенок является кварцевое стекло, характеризующееся акустическим импедансом Z_1. Верхняя граница предполагается границей раздела «вода–воздух» и обладает импедансом Z_2.

При заданных граничных условиях распределение давления представляет собой чередование зон его максимального и минимального значений, разделенных узловыми поверхностями. Однако другие условия отражения на стенках приводит к иному распределению давления вблизи боковых границ: здесь появляются зоны, в которых акустическое давление имеет отличное от нуля значение. Изменение же рабочей частоты излучателя f от 13.4 кГц (Рис. 8*а*) до 29.5 кГц (Рис. 8*г*) приводит к увеличению числа узловых поверхностей, рассредоточенных вдоль акустической оси излучателя.

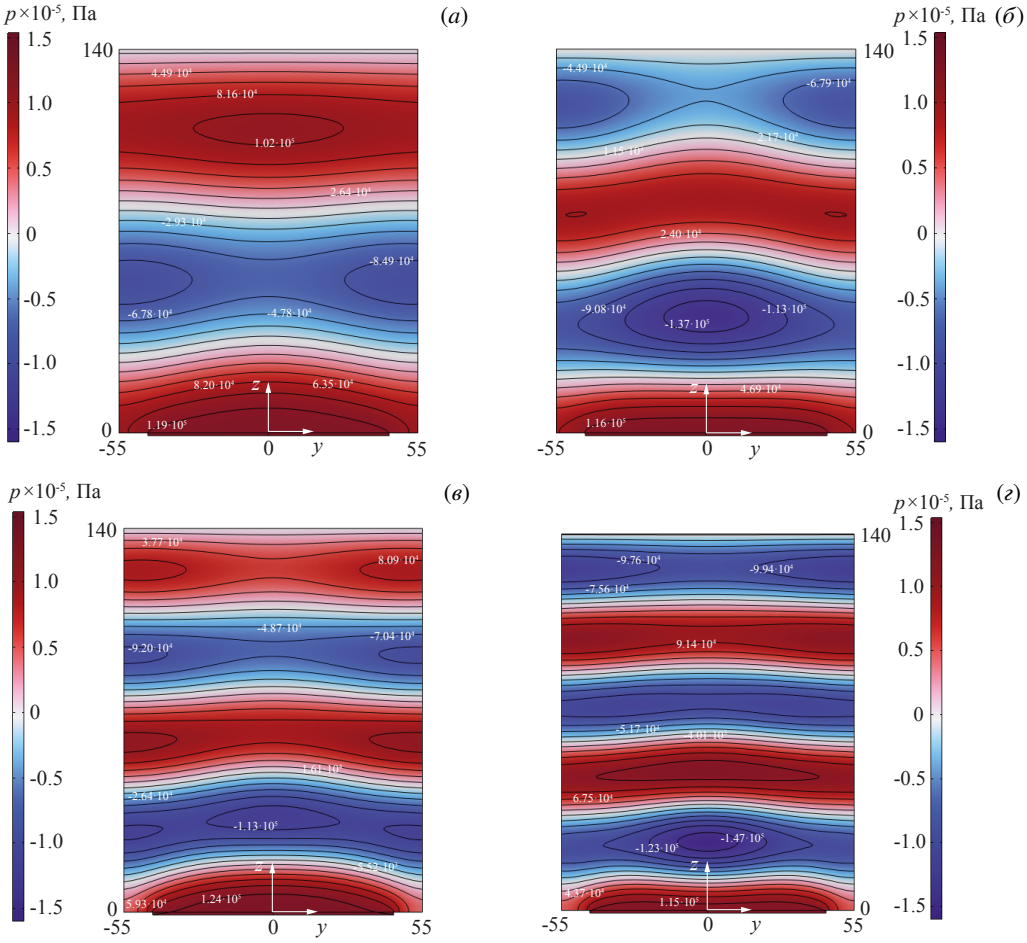


Рис. 8. Картины распределения акустического давления $p(y,z)$ над излучателем в параллелепипеде с боковыми стенками из кварцевого стекла ($Z_1 = 1.44 \times 10^7$ кг/(м²·с)) и верхней границей раздела «вода–воздух» ($Z_2 = 4.08 \times 10^2$ кг/(м²·с)), полученные при резонансных условиях: $f_5 = 13.4$ кГц (*а*), $f_7 = 18.75$ кГц (*б*), $f_9 = 24.2$ кГц (*в*), $f_{11} = 29.5$ кГц (*г*)

Следует отметить, что вблизи верхней границы при любой рабочей частоте излучателя всегда имеет место зона низкого давления. Также не зависит от частоты и присутствие вблизи поверхности излучателя зоны высокого давления. Подобное распределение давления вблизи излучателя ранее наблюдалось при нерезонансных частотах в прямоугольном параллелепипеде со звуконепроницаемыми границами (Рис. 6).

Граница «вода–кварцевое стекло» как верхняя граница полости, характеризующаяся большим акустическим импедансом, приводит к существенному изменению распределения акустического давления в центральном сечении (Рис. 9). Узловые плоскости приобретают более сложную форму за счет взаимодействия ультразвуковой волны с верхней и боковой границами, появляются локальные максимумы давления в центре расчетной области.

С увеличением частоты f происходит перераспределение акустического давления вдоль акустической оси излучателя, и при частоте $f_{11} = 29.5$ кГц зоны высокого давления оказываются сосредоточенными в основном в нижней части рабочей полости и вблизи ее верхней границы (Рис. 9*г*).

Для параллелепипеда с твердыми боковыми границами получены профили давления вдоль акустической оси излучателя при резонансных условиях (Рис. 10). При сравнении с рисунком 7 видно, что при верхней границе «вода–воздух» (Рис. 10*а*) рассчитанные профили давления аналогичны профилям давления в полости со

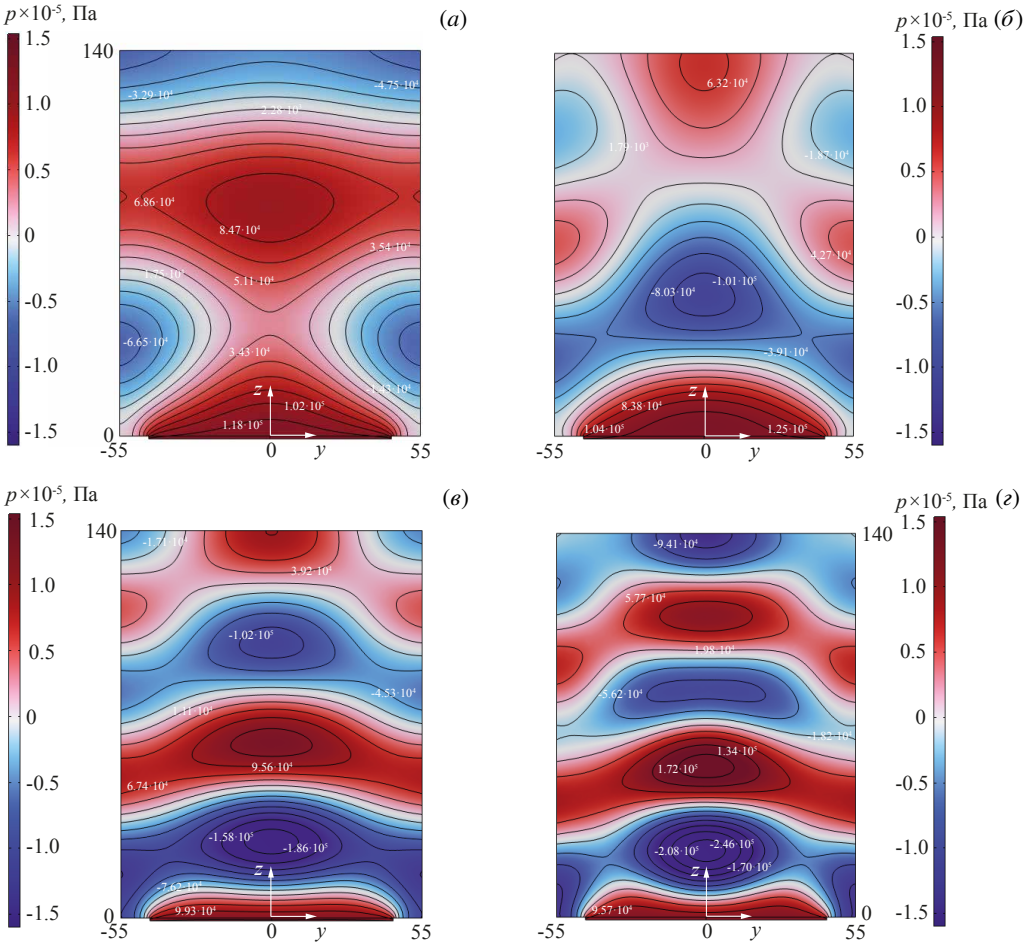


Рис. 9. Картины распределения акустического давления $p(y,z)$ над излучателем в параллелепипеде с боковыми стенками из кварцевого стекла и верхней границей «вода–кварцевое стекло» ($Z_1 = 1.44 \times 10^7$ кг/(м²·с)) при резонансных условиях: $f_5 = 13.4$ кГц (*а*), $f_7 = 18.75$ кГц (*б*), $f_9 = 24.2$ кГц (*в*), $f_{11} = 29.5$ кГц (*г*)

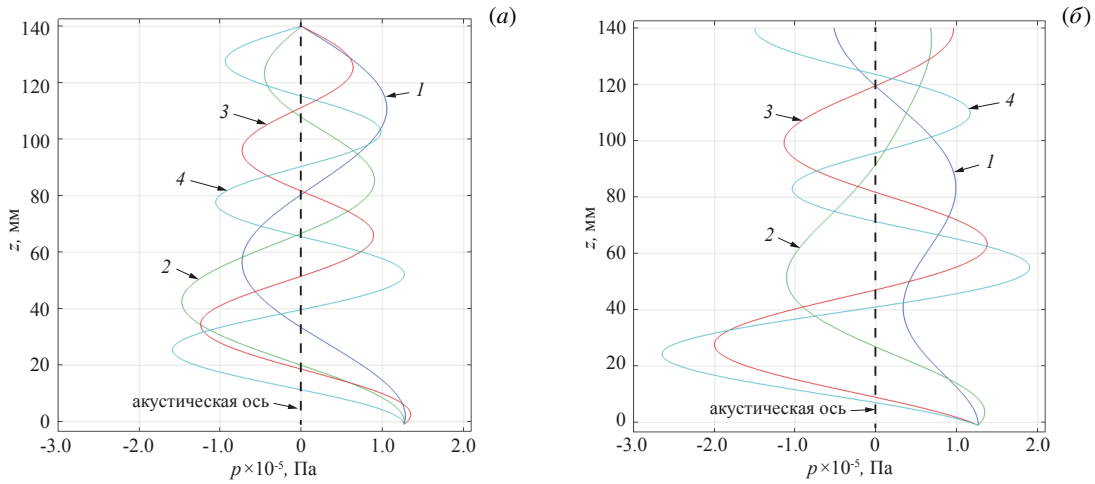


Рис. 10. Профили акустического давления $p(z)$ вдоль акустической оси излучателя в параллелепипеде с боковыми стенками из кварцевого стекла ($Z_1 = 1.44 \times 10^7$ кг/(м²·с)) и верхней границе с разными акустическими свойствами: «вода–воздух» ($Z_2 = 4.08 \times 10^2$ кг/(м²·с)) (*а*) и «вода–кварцевое стекло» ($Z_1 = 1.44 \times 10^7$ кг/(м²·с)) (*б*) при резонансных условиях: $f_5 = 13.4$ кГц (*1*), $f_7 = 18.75$ кГц (*2*), $f_9 = 24.2$ кГц (*3*), $f_{11} = 29.5$ кГц (*4*)

звуконепроницаемыми границами при нерезонансных условиях (Рис. 7*б*). При этом давление вблизи поверхности излучателя также положительно и обращается в нуль у верхней границы полости. В отличие от параллелепипеда со звуконепроницаемыми границами (Рис. 7*а*), амплитуда давления p, вычисленная при частоте $f_7 = 18.75$ кГц и твердых боковых границах, сопоставима с амплитудой давления при других резонансных частотах (Рис. 10*а*). При границе раздела «вода–кварцевое стекло» на профилях давления отсутствует какая-либо выраженная резонансная частота (Рис. 10*б*), а при частоте $f_7 = 18.75$ кГц профиль давления содержит только один пик, соответствующий минимуму акустического давления. Важно также отметить, что при верхней границе раздела «вода–кварцевое стекло» давление на акустической оси излучателя вблизи нее не обращается в нуль.

5.3. Сравнение с экспериментом

В рамках поставленной задачи для сравнения с натурным экспериментом выполнено моделирование распределения акустического давления в жидкости в условиях стоячей ультразвуковой волны в рабочей полости $109 \times 109 \times 140$ мм^3 (в прямоугольном параллелепипеде) над излучателем $r_2 = 44$ мм при двух вариантах боковых границ: I — боковые границы из кварцевого стекла, верхняя граница вида «вода–воздух»; II — все границы из кварцевого стекла. Частота излучателя задавалась равной $f = 28$ кГц ($P_{US} = 32$ Вт). На рисунке 11 приведено распределение акустического давления в центральном сечении рабочей полости. При заданной частоте вблизи поверхности излучателя, а также у верхней границы полости образуются зоны, в которых давление $p > 0$ (Рис. 11*а*). По акустической оси излучателя располагаются четыре узловые поверхности. В соответствии с профилем давления (см. Рис. 11*в*) на расстоянии 30 мм от излучателя присутствует зона, в которой давление минимально.

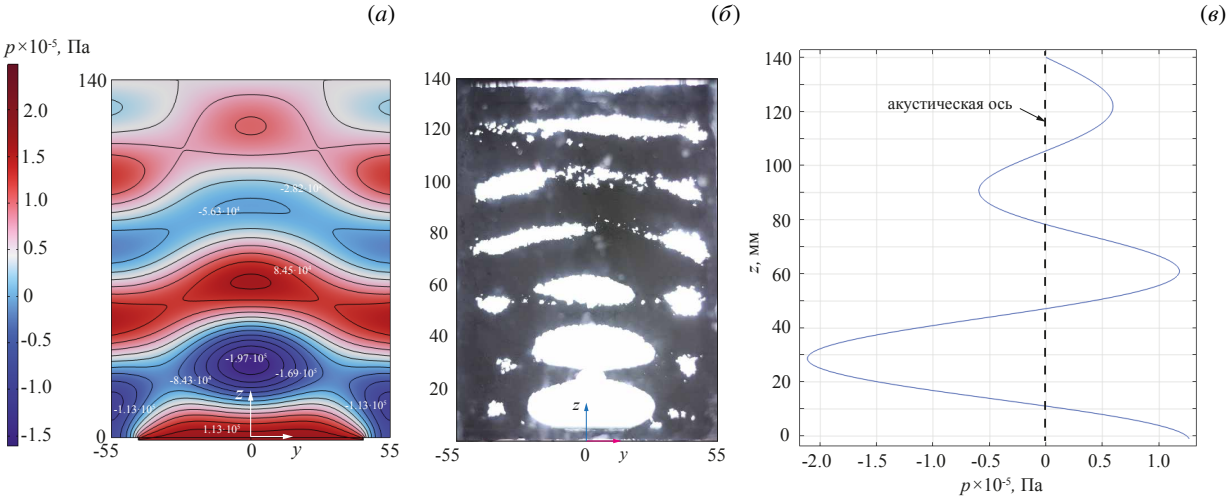


Рис. 11. Вариант I стенок: распределение акустического давления $p(y,z)$ (*а*); изображение алюминиевой фольги в плоскости $x = 0$ мм (*б*); профиль полного давления $p(z)$ (*в*)

При аналогичных условиях осуществлен натурный эксперимент. В ходе наблюдения за фольгой при помощи метода foil test установлен характер расположения зон кавитационной активности в центральном сечении рабочей полости. Съемка поверхности фольги выполнена через 400 с после включения генератора. К моменту съемки в рабочей полости формируется стоячая ультразвуковая волна. На снимке (Рис. 11*б*) видны характерные локализованные зоны разрушения (зоны кавитационной эрозии), обусловленные перераспределением энергии в стоячей волне между зонами высокого давления (пучностями) и нулевого давления (узлами). В результате формируется несколько зон с наибольшей кавитационной активностью (светлые участки), рассредоточенных не только по акустической оси излучателя, но и вблизи твердых боковых границ. Расстояние между центрами этих участков на акустической оси составляет в среднем 25 мм. По площади светлых участков на изображении фольги можно судить об интенсивности кавитационной активности, а по их расположению — о структуре стоячей ультразвуковой волны.

В рабочей полости, верхняя и боковые стенки которой выполнены из кварцевого стекла, разрушение фольги происходит иначе (Рис. 12*б*). Наибольшая кавитационная активность наблюдается в основном в локальных зонах (белые участки), рассредоточенных по акустической оси излучателя и вблизи боковых границ полости. Увеличение площади неразрушенной фольги (темные участки), по сравнению с рисунком 11*б*, свидетельствует об уменьшении кавитационной активности в рабочей полости.

Результаты численного моделирования, полученные для разных вариантов границ области исследования (Рис. 11, 12) и без учета потерь звуковой энергии за счет затухания демонстрируют различия в характере распределения акустического давления в жидкости. Данные натурного эксперимента также показывают разное расположение зон кавитационной активности, особенно вблизи верхней и боковой границы полости. Наименьшая кавитационная активность при этом (судя по интенсивности разрушения фольги) имеет место внутри рабочей

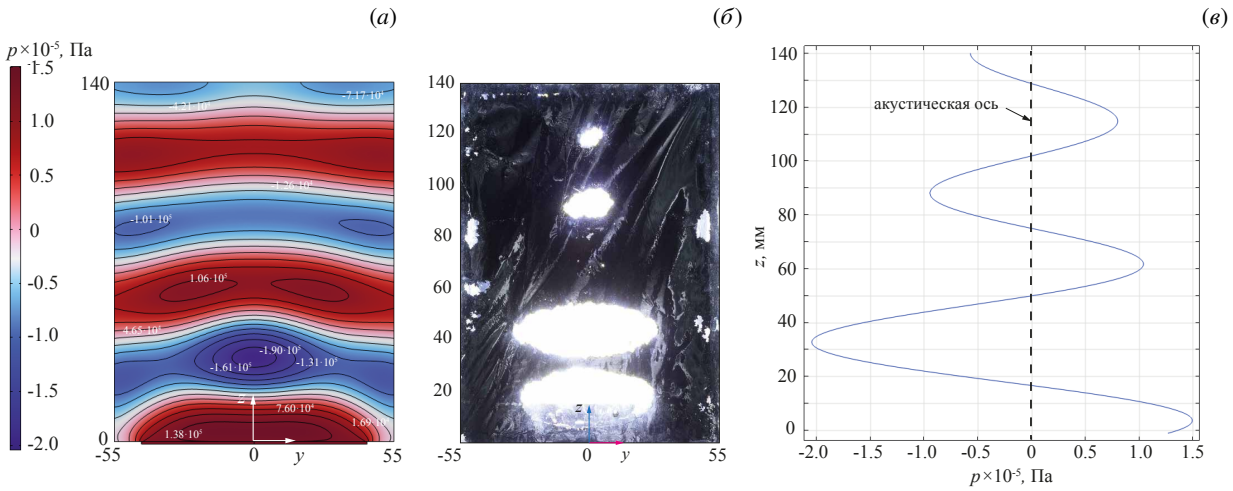


Рис. 12. Вариант II стенок: распределение акустического давления $p(y,z)$ (*а*); изображение алюминиевой фольги в плоскости $x = 0$ мм (*б*); распределение (профиль) полного давления $p(z)$ (*в*)

полости, верхняя и боковая границы которой характеризуются одинаковым значением акустического импеданса (в полости из кварцевого стекла). При этом уменьшение площади разрушений фольги, по-видимому, связано с тем, что давление при таких границах ниже порога кавитации (в эксперименте затухание играет существенную роль). Поэтому для более точного анализа результатов численного моделирования и эксперимента в будущих исследованиях необходимо учитывать затухание ультразвуковых волн в жидкости, в том числе, обусловленное возникновением и взаимодействием парогазовых пузырьков (например, использовать модель пузырьковой среды), а также рассматривать зависимость свойств жидкости от внешних условий (температуры и давления).

6. Выводы

Проведено численное моделирование распределения акустического давления в жидкости над круглым излучателем. Рассмотрена рабочая полость в форме прямого круглого цилиндра и в форме прямоугольного параллелепипеда, заполненные жидкостью. Изучалось распространение ультразвуковых стоячих волн, при этом жидкая среда полагалась сжимаемой. Диссипация звуковой энергии, обусловленная вязким трением и образованием парогазовых пузырьков в жидкости, не учитывалась. Исследовано распределение акустического давления в условиях стоячей ультразвуковой волны при резонансных и нерезонансных частотах излучателя в диапазоне от 10.7 до 29.5 кГц при постоянной мощности излучения 32 Вт.

Методом foil test осуществлено экспериментальное определение расположения зон кавитационной активности и выполнено сравнение расчетного распределения акустического давления в центральном сечении рабочей полости с фотографиями алюминиевой фольги, полученными в натурном эксперименте.

Сравнение результатов численного моделирования и натурного эксперимента показало, что в нижней части полости центры зон разрушения фольги совпадают с узлами стоячей ультразвуковой волны, а в верхней — с пучностями, что требует проведения дополнительных натурных испытаний, учитывающих динамику отдельных пузырьков в этих зонах.

Для приближения данных, определяемых путем численного моделирования, к экспериментальным результатам необходимо учитывать затухание звуковых волн, в том числе за счет возникновения парогазовых пузырьков в жидкости, а также принимать во внимание нестабильность рабочей частоты и неравномерность колебаний рабочей поверхности излучателя. И хотя экспериментальная проверка теоретических моделей является трудоемкой задачей, в случаях, когда необходимы достоверные результаты расчета, это наиболее надежный способ их верификации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 24-11-00269.

Литература

1. *Ashokkumar M.*, *Lee J.*, *Kentish S.*, *Grieser F.* Bubbles in an acoustic field: An overview // Ultrasonics Sonochemistry. 2007. Vol. 14, no. 4. P. 470–475. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.09.016
2. *Ashokkumar M.* The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18, no. 4. P. 864–872. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.016
3. *Бутюгина Е.В.*, *Насибуллаева Э.Ш.*, *Гумеров Н.А.*, *Ахатов И.Ш.* Численное моделирование динамики газового микропузырька в акустическом поле с учетом процесса направленной диффузии // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, № 3. С. 234–244. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.3.23

4. *Коновалов В.В.*, *Любимова Т.П.* Численное исследование влияния вибраций на взаимодействие в ансамбле газовых пузырьков и твердых частиц в жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12, № 1. С. 48–56. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.1.5
5. *Sboev I.*, *Lyubimova T.*, *Rybkin K.*, *Kuchinskiy M.* A Numerical Investigation of the Effect of Boundary Conditions on Acoustic Pressure Distribution in a Sonochemical Reactor Chamber // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2024. Vol. 20, no. 6. DOI: 10.32604/fdmp.2024.051341
6. *Yasui K.* Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-68237-2
7. *Nguyen T.T.*, *Asakura Y.*, *Koda S.*, *Yasuda K.* Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 39. P. 301–306. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.037
8. *Arndt R.E.* Recent Advances in Cavitation Research //. Vol. 12. 1981. P. 1–78. DOI: 10.1016/B978-0-12-021812-7.50006-7
9. *Chatel G.*, *Colmenares J.C.* Sonochemistry: From Basic Principles to Innovative Applications. 2017. Topics in Current Chemistry. DOI: 10.1007/978-3-319-54271-3
10. *Kuchinskiy M.*, *Lyubimova T.*, *Rybkin K.*, *Sadovnikova A.*, *Galishevskiy V.* Investigation of Cavitation in NaCl Solutions in a Sonochemical Reactor Using the Foil Test Method // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2024. Vol. 20, no. 5. DOI: 10.32604/fdmp.2024.050059
11. *Leong T.*, *Johansson L.*, *Juliano P.*, *McArthur S.L.*, *Manasseh R.* Ultrasonic Separation of Particulate Fluids in Small and Large Scale Systems: A Review // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. Vol. 52, no. 47. P. 16555–16576. DOI: 10.1021/ie402295r
12. *Trujillo F.J.*, *Juliano P.*, *Barbosa-Cánovas G.*, *Knoerzer K.* Separation of suspensions and emulsions via ultrasonic standing waves -– A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, no. 6. P. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016
13. *Luo X.*, *Gong H.*, *Yin H.*, *He Z.*, *He L.* Optimization of acoustic parameters for ultrasonic separation of emulsions with different physical properties // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 68. 105221. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105221
14. *Chen Y.*, *Truong V.N.T.*, *Bu X.*, *Xie G.* A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 60. 104739. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104739
15. *Mao Y.*, *Xia W.*, *Peng Y.*, *Xie G.* Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review // Fuel Processing Technology. 2019. Vol. 195. 106150. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106150
16. *Altun N.E.*, *Hwang J.-Y.*, *Hicyilmaz C.* Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment // International Journal of Mineral Processing. 2009. Vol. 91, no. 1/2. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.10.003
17. *Wang H.*, *Yang W.*, *Yan X.*, *Wang L.*, *Wang Y.*, *Zhang H.* Regulation of bubble size in flotation: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8, no. 5. 104070. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104070
18. *Sutkar V.S.*, *Gogate P.R.*, *Csoka L.* Theoretical prediction of cavitational activity distribution in sonochemical reactors // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 158, no. 2. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.049
19. Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction. Vol. 106 / ed. by K. Kim, G. Chahine, J. Franc, A. Karimi. Springer Netherlands, 2014. Fluid Mechanics and Its Applications. DOI: 10.1007/978-94-017-8539-6
20. *Gogate P.R.*, *Tatake P.A.*, *Kanthale P.M.*, *Pandit A.B.* Mapping of sonochemical reactors: Review, analysis, and experimental verification // AIChE Journal. 2002. Vol. 48, no. 7. P. 1542–1560. DOI: 10.1002/aic.690480717
21. *Wei Z.*, *Weavers L.K.* Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. Vol. 31. P. 490–498. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.036
22. *Klíma J.*, *Frias-Ferrer A.*, *González-García J.*, *Ludvík J.*, *Saez V.*, *Iniesta J.* Optimisation of 20 kHz sonoreactor geometry on the basis of numerical simulation of local ultrasonic intensity and qualitative comparison with experimental results // Ultrasonics Sonochemistry. 2007. Vol. 14, no. 1. P. 19–28. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.01.001
23. *Krefting D.*, *Mettin R.*, *Lauterborn W.* High-speed observation of acoustic cavitation erosion in multibubble systems // Ultrasonics Sonochemistry. 2004. Vol. 11, no. 3/4. P. 119–123. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2004.01.006
24. *Rossing T.D.* Springer Handbook of Acoustics. Springer New York, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4939-0755-7
25. *Bampouli A.*, *Goris Q.*, *Van Olmen J.*, *Solmaz S.*, *Noorul Hussain M.*, *Stefanidis G.D.*, *Van Gerven T.* Understanding the ultrasound field of high viscosity mixtures: Experimental and numerical investigation of a lab scale batch reactor // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 97. 106444. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106444
26. *Liu L.*, *Wen J.*, *Yang Y.*, *Tan W.* Ultrasound field distribution and ultrasonic oxidation desulfurization efficiency // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 696–702. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.10.009
27. *Servant G.*, *Laborde J.-L.*, *Hita A.*, *Caltagirone J.-P.*, *Gérard A.* Spatio-temporal dynamics of cavitation bubble clouds in a low frequency reactor: comparison between theoretical and experimental results // Ultrasonics Sonochemistry. 2001. Vol. 8, no. 3. P. 163–174. DOI: 10.1016/S1350-4177(01)00074-8
28. *Lyubimova T.*, *Rybkin K.*, *Fattalov O.*, *Kuchinskiy M.*, *Filippov L.* Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound // Ultrasonics. 2021. Vol. 117. 106516. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106516
29. *Kaltenbacher M.* Computational Acoustics. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-59038-7

ISSN: 1999-6691, e-ISSN: 2782-3709 DOI: http://doi.org/10.7242/1999-6691/2025.18.1.6

30. *Rashwan S.S.*, *Mohany A.*, *Dincer I.* Development of efficient sonoreactor geometries for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46, no. 29. P. 15219–15240. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.113

31. *Tudela I.*, *Sáez V.*, *Esclapez M.D.*, *Díez-García M.I.*, *Bonete P.*, *González-García J.* Simulation of the spatial distribution of the acoustic pressure in sonochemical reactors with numerical methods: A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, no. 3. P. 909–919. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.11.012

32. *Laborde J.-L.*, *Bouyer C.*, *Caltagirone J.-P.*, *Gérard A.* Acoustic cavitation field prediction at low and high frequency ultrasounds // Ultrasonics. 1998. Vol. 36, no. 1–5. P. 581–587. DOI: 10.1016/S0041-624X(97)00106-6

33. *Tao T.*, *Zhao J.*, *Wang W.* Study on the Characterization Method of Ultrasonic Cavitation Field based on the Numerical Simulation of the Amplitude of Sound Pressure // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 319. 02003. DOI: 10.1051/matecconf/202031902003

34. *Wang Y.-C.*, *Yao M.-C.* Realization of cavitation fields based on the acoustic resonance modes in an immersion-type sonochemical reactor // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20, no. 1. P. 565–570. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.026

Сведения об авторах:

Сбоев Иван Олегович (корр.), б/с, инж., АО «ОДК-Авиадвигатель», 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 93; e-mail: ivan-sboev@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-8574-1267

Любимова Татьяна Петровна, дфмн, проф., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: lyubimovat@mail.ru; ORCID: 0000-0002-8212-2890

Кучинский Михаил Олегович, б/с, мнс, ИМСС УрО РАН; e-mail: kat6chinskiy@gmail.com; ORCID: 0000-0003-3301-3337

Рыбкин Константин Анатольевич, кфмн, доц., Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15; e-mail: k.rybkin@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5922-0815

Research article

Spatial distribution of acoustic pressure and cavitation activity zones in a fluid system: numerical modelling and experiment

***I.O. Sboev*[1], *T.P. Lyubimova*[2], *M.O. Kuchinskiy*[2], *K.A. Rybkin*[3]**

[1] *UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation*
[2] *Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation*
[3] *Perm State University, Perm, Russian Federation*

One of the areas of study of physicochemical processes occurring in liquids under the influence of high-frequency sound vibrations (ultrasound) is the determination of the role of acoustic cavitation. This phenomenon occurs due to the uneven distribution of acoustic pressure generated by an ultrasound source (emitter) inside the working chamber. The objective of this article is to study numerically the three-dimensional stationary distribution of acoustic pressure in a working cavity filled with a liquid with constant physicochemical properties using the COMSOL Multiphysics software. In addition to numerical modeling, we also conduct an experimental study in which a foil test technique is applied to determine the location of the areas where cavitation takes place; the results of the test are estimated by their comparison with the calculated acoustic field structure inside the working chamber. Within the framework of the developed numerical model, for simplicity we consider standing ultrasonic waves. Two geometrical configurations of a computational domain are used: a circular cylinder and a rectangular parallelepiped. The stationary distribution of acoustic pressure over a circular radiator is analyzed. It is assumed that ultrasonic standing waves propagate in a compressible medium with sound energy dissipation due to viscous friction or the formation of vapor-gas bubbles in the liquid being neglected. We set zero pressure or an impedance condition at the upper and lateral boundaries of the working cavity. We investigate the distribution of acoustic pressure in standing ultrasonic waves at resonant and non-resonant operating frequencies of the emitter. The acoustic pressure distribution in the central section of the working cavity is compared with photographs of the aluminum foil surface obtained in a full-scale experiment using the foil test method.

Keywords: ultrasonic standing waves, acoustic cavitation, foil test technique, cavitation activity, acoustic pressure, numerical simulation, COMSOL Multiphysics software

Received: 25.11.2024 / *Published online*: 10.04.2025

References

1. *Ashokkumar M.*, *Lee J.*, *Kentish S.*, *Grieser F.* Bubbles in an acoustic field: An overview. Ultrasonics Sonochemistry. 2007. Vol. 14, no. 4. P. 470–475. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.09.016

2. *Ashokkumar M.* The characterization of acoustic cavitation bubbles — An overview. Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18, no. 4. P. 864–872. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.016

3. *Butyugina E.V.*, *Nasibullaeva E.S.*, *Gumerov N.A.*, *Akhatov I.S.* Numerical simulations of gas microbubble dynamics in an acoustic field with the influence of rectified diffusion. Computational Continuum Mechanics. 2014. Vol. 7, no. 3. P. 234–244. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.3.23

©Authors 2025 Translation of the original article in Russian This is an open access article under the CC BY 4.0 license

4. *Konovalov V.V.*, *Lyubimova T.P.* Numerical study of the effect of vibrations on the interaction in an ensemble of gas bubbles and solid particles in a liquid. Computational Continuum Mechanics. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 48–56. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.1.5
5. *Sboev I.*, *Lyubimova T.*, *Rybkin K.*, *Kuchinskiy M.* A Numerical Investigation of the Effect of Boundary Conditions on Acoustic Pressure Distribution in a Sonochemical Reactor Chamber. Fluid Dynamics & Materials Processing. 2024. Vol. 20, no. 6. DOI: 10.32604/fdmp.2024.051341
6. *Yasui K.* Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-68237-2
7. *Nguyen T.T.*, *Asakura Y.*, *Koda S.*, *Yasuda K.* Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency. Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 39. P. 301–306. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.037
8. *Arndt R.E.* Recent Advances in Cavitation Research. Vol. 12. 1981. P. 1–78. DOI: 10.1016/B978-0-12-021812-7.50006-7
9. *Chatel G.*, *Colmenares J.C.* Sonochemistry: From Basic Principles to Innovative Applications. 2017. Topics in Current Chemistry. DOI: 10.1007/978-3-319-54271-3
10. *Kuchinskiy M.*, *Lyubimova T.*, *Rybkin K.*, *Sadovnikova A.*, *Galishevskiy V.* Investigation of Cavitation in NaCl Solutions in a Sonochemical Reactor Using the Foil Test Method. Fluid Dynamics & Materials Processing. 2024. Vol. 20, no. 5. DOI: 10.32604/fdmp.2024.050059
11. *Leong T.*, *Johansson L.*, *Juliano P.*, *McArthur S.L.*, *Manasseh R.* Ultrasonic Separation of Particulate Fluids in Small and Large Scale Systems: A Review. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. Vol. 52, no. 47. P. 16555–16576. DOI: 10.1021/ie402295r
12. *Trujillo F.J.*, *Juliano P.*, *Barbosa-Cánovas G.*, *Knoerzer K.* Separation of suspensions and emulsions via ultrasonic standing waves -– A review. Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, no. 6. P. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016
13. *Luo X.*, *Gong H.*, *Yin H.*, *He Z.*, *He L.* Optimization of acoustic parameters for ultrasonic separation of emulsions with different physical properties. Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 68. 105221. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105221
14. *Chen Y.*, *Truong V.N.T.*, *Bu X.*, *Xie G.* A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 60. 104739. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104739
15. *Mao Y.*, *Xia W.*, *Peng Y.*, *Xie G.* Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. Fuel Processing Technology. 2019. Vol. 195. 106150. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106150
16. *Altun N.E.*, *Hwang J.-Y.*, *Hicyilmaz C.* Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. International Journal of Mineral Processing. 2009. Vol. 91, no. 1/2. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.10.003
17. *Wang H.*, *Yang W.*, *Yan X.*, *Wang L.*, *Wang Y.*, *Zhang H.* Regulation of bubble size in flotation: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8, no. 5. 104070. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104070
18. *Sutkar V.S.*, *Gogate P.R.*, *Csoka L.* Theoretical prediction of cavitational activity distribution in sonochemical reactors. Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 158, no. 2. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.049
19. Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction. Vol. 106 / ed. by K. Kim, G. Chahine, J. Franc, A. Karimi. Springer Netherlands, 2014. Fluid Mechanics and Its Applications. DOI: 10.1007/978-94-017-8539-6
20. *Gogate P.R.*, *Tatake P.A.*, *Kanthale P.M.*, *Pandit A.B.* Mapping of sonochemical reactors: Review, analysis, and experimental verification. AIChE Journal. 2002. Vol. 48, no. 7. P. 1542–1560. DOI: 10.1002/aic.690480717
21. *Wei Z.*, *Weavers L.K.* Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors. Ultrasonics Sonochemistry. 2016. Vol. 31. P. 490–498. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.036
22. *Klíma J.*, *Frias-Ferrer A.*, *González-García J.*, *Ludvík J.*, *Saez V.*, *Iniesta J.* Optimisation of 20 kHz sonoreactor geometry on the basis of numerical simulation of local ultrasonic intensity and qualitative comparison with experimental results. Ultrasonics Sonochemistry. 2007. Vol. 14, no. 1. P. 19–28. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.01.001
23. *Krefting D.*, *Mettin R.*, *Lauterborn W.* High-speed observation of acoustic cavitation erosion in multibubble systems. Ultrasonics Sonochemistry. 2004. Vol. 11, no. 3/4. P. 119–123. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2004.01.006
24. *Rossing T.D.* Springer Handbook of Acoustics. Springer New York, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4939-0755-7
25. *Bampouli A.*, *Goris Q.*, *Van Olmen J.*, *Solmaz S.*, *Noorul Hussain M.*, *Stefanidis G.D.*, *Van Gerven T.* Understanding the ultrasound field of high viscosity mixtures: Experimental and numerical investigation of a lab scale batch reactor. Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 97. 106444. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106444
26. *Liu L.*, *Wen J.*, *Yang Y.*, *Tan W.* Ultrasound field distribution and ultrasonic oxidation desulfurization efficiency. Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 696–702. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.10.009
27. *Servant G.*, *Laborde J.-L.*, *Hita A.*, *Caltagirone J.-P.*, *Gérard A.* Spatio-temporal dynamics of cavitation bubble clouds in a low frequency reactor: comparison between theoretical and experimental results. Ultrasonics Sonochemistry. 2001. Vol. 8, no. 3. P. 163–174. DOI: 10.1016/S1350-4177(01)00074-8
28. *Lyubimova T.*, *Rybkin K.*, *Fattalov O.*, *Kuchinskiy M.*, *Filippov L.* Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound. Ultrasonics. 2021. Vol. 117. 106516. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106516
29. *Kaltenbacher M.* Computational Acoustics. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-59038-7

30. *Rashwan S.S.*, *Mohany A.*, *Dincer I.* Development of efficient sonoreactor geometries for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46, no. 29. P. 15219–15240. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.113

31. *Tudela I.*, *Sáez V.*, *Esclapez M.D.*, *Díez-García M.I.*, *Bonete P.*, *González-García J.* Simulation of the spatial distribution of the acoustic pressure in sonochemical reactors with numerical methods: A review. Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, no. 3. P. 909–919. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.11.012

32. *Laborde J.-L.*, *Bouyer C.*, *Caltagirone J.-P.*, *Gérard A.* Acoustic cavitation field prediction at low and high frequency ultrasounds. Ultrasonics. 1998. Vol. 36, no. 1–5. P. 581–587. DOI: 10.1016/S0041-624X(97)00106-6

33. *Tao T.*, *Zhao J.*, *Wang W.* Study on the Characterization Method of Ultrasonic Cavitation Field based on the Numerical Simulation of the Amplitude of Sound Pressure. MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 319. 02003. DOI: 10.1051/matecconf/202031902003

34. *Wang Y.-C.*, *Yao M.-C.* Realization of cavitation fields based on the acoustic resonance modes in an immersion-type sonochemical reactor. Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20, no. 1. P. 565–570. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.026