

УДК 534.2; 615.47:616-71

Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации

Скворцов С. П.^{1,*}

^{*}bmt203@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приведен обзор физических процессов, лежащих в основе действия ультразвуковой кавитации. Эти процессы в первую очередь определяются скоростью схлопывания пузырьков, энергией кавитации и индексом кавитации. Проанализированы основные методы контроля кавитации и выделены методы, позволяющие определить параметры пульсаций пузырьков. К ним относятся метод оптического зондирования кавитационной области и метод анализа спектральных компонент акустического кавитационного шума. Отмечена их универсальность и малая инерционность при использовании для контроля параметров кавитации. Контроль параметров пульсаций позволяет глубже понять физические механизмы действия кавитации в различных областях.

Ключевые слова: ультразвуковая кавитация, кавитационные пузырьки, кавитационная область, пульсации, интенсивность кавитации, контроль, оптическое зондирование, лазер, кавитационный шум, субгармоники, акустическая мощность, звукохимия, сонолюминесценция

Введение

При распространении в жидкости ультразвуковых волн большой интенсивности возникают явления, с которыми связывают разнообразные эффекты ультразвука, используемые в технологиях ультразвуковой очистки, медицине, звукохимии и других областях. К этим явлениям в первую очередь относятся кавитация, акустические течения и радиационное давление [1-3].

Эффектами ультразвуковой кавитации являются очистка поверхностей от отложений, эрозия материалов, капиллярный эффект, увеличение поверхности диффузии, диспергирование, эмульгирование, дегазация, звукохимические реакции и сонолюминесценция, а при воздействии на биологические ткани также тиксотропный эффект, усиление проницаемости мембран, активизация ферментативной активности и др.[3,4,5].

Основным явлением при распространении в жидкости мощного низкочастотного ультразвука в диапазоне от 20 кГц до 100 кГц при амплитудах переменного звукового давления порядка единиц атмосфер и выше является кавитация. Наиболее часто на

практике реализуется многопузырьковая кавитация, когда ансамбль пульсирующих пузырьков образует кавитационную область. Эта область выступает в роли своеобразного «вторичного» инструмента, непосредственно воздействуя в объеме на компоненты раствора либо на поверхность контактирующего материала.

На сегодняшний день в разных областях применения ультразвука накоплен большой опыт контроля и оптимизации процессов, использующих кавитацию. Однако применяемые критерии трудно сопоставимы между собой и не являются универсальными, так как зависят от конкретных условий применения и методов измерения. Это делает подчас невозможным анализ накопленного опыта и развитие соответствующих технологий. Особенно актуальной эта проблема становится в технологии ультразвуковой хирургии и терапии, в частности, для лечения инфицированных ран, импрегнации лекарственных веществ, где многие методы контроля недоступны из-за специфичных медицинских требований.

Решением этой проблемы может быть использование таких методов контроля кавитации, которые количественно характеризуют физические процессы, лежащие в основе всех многообразных эффектов ультразвука.

Настоящая работа посвящена анализу существующих методов контроля ультразвуковой кавитации и обоснованию применения выбранных методов.

Ультразвуковая кавитация

Согласно современным представлениям, кавитация включает в себя пульсации, схлопывание и различные виды движений пузырьков в жидкости под действием переменного звукового давления [2]. Кавитационные пузырьки возникают в жидкости из так называемых зародышей кавитации при превышении амплитудой переменного звукового давления критического значения, называемого порогом кавитации. В качестве зародышей кавитации могут выступать пузырьки содержащегося в жидкости газа или микрочастицы примесей, способствующие разрыву жидкости при растягивающих усилиях. Рост пузырька начинается в фазе разрежения звукового поля, при этом происходит испарение жидкости внутрь пузырька и диффузия в пузырек растворенных в жидкости газов. Динамика пузырька определяется совместным действием переменного звукового давления, гидростатического давления, давления парогазовой смеси внутри пузырька, силами поверхностного натяжения, которые обуславливают сложный закон изменения радиуса пузырька от времени. При малых амплитудах звукового давления пузырек может длительное время пульсировать без схлопывания, а при больших амплитудах, называемых также порогом развитой кавитации [2], пузырьки начинают схлопываться и появляться вновь.

При схлопывании кавитационных пузырьков образуются ударные волны двух типов [6]:

а) ударные волны в жидкости, направленные в сторону от пузырька, возникающие в результате высоких давлений на границе кавитационного пузырька в фазе его наибольшего сжатия;

б) ударные волны в пузырьке, направленные к его центру и возникающие во время его схлопывания при превышении стенкой пузырька скорости звука в парогазовой смеси, находящейся внутри пузырька. В результате происходит локальное повышение температуры, по разным оценкам достигающее сотен и даже нескольких тысяч К [1,2,6].

При схлопывании пузырька вблизи твердой поверхности многими авторами описано образование кумулятивных струй, направленных в сторону поверхности [6]. Кроме того, взаимодействие пульсирующих пузырьков приводит к появлению направленного течения в сторону от излучателя со скоростью до нескольких метров в секунду [1].

Таким образом, действие кавитации непосредственно связано с образованием ударных волн, локальными кратковременными повышениями температуры, микротечениями около пульсирующих пузырьков и кумулятивной струей.

Для описания пульсаций одиночных пузырьков используют уравнения, различающиеся учетом сил поверхностного натяжения, сжимаемости жидкости и др. На рис. 1 приведены зависимости радиуса одиночного пузырька в воде с начальным радиусом $R_0=5$ мкм, полученные автором для частоты 26,5 кГц путем численного интегрирования уравнения Кирквуда-Бёте [1] методом Рунге-Кутты. Видно, что пузырек может схлопываться как в первом периоде звуковой волны (однопериодные пульсации), так и во втором (двухпериодные пульсации), третьем (трехпериодные пульсации) и др. периодах звуковой волны при увеличении амплитуды колебаний излучателя.

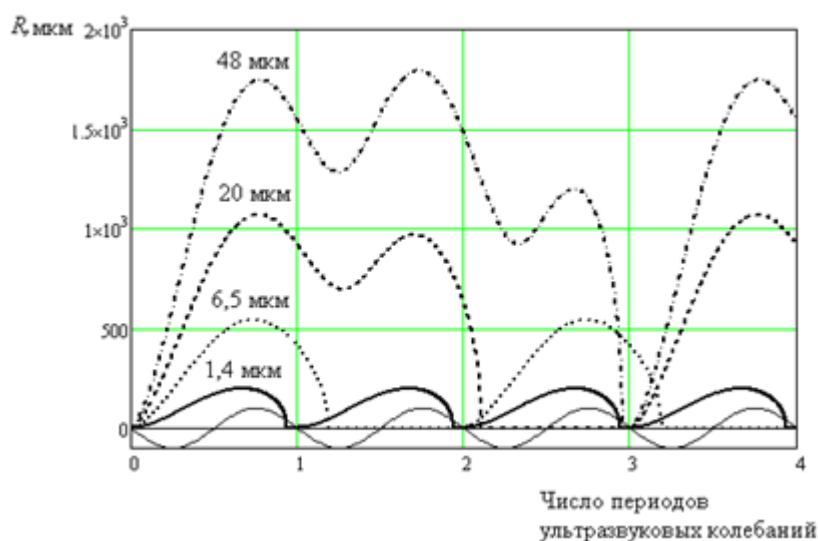
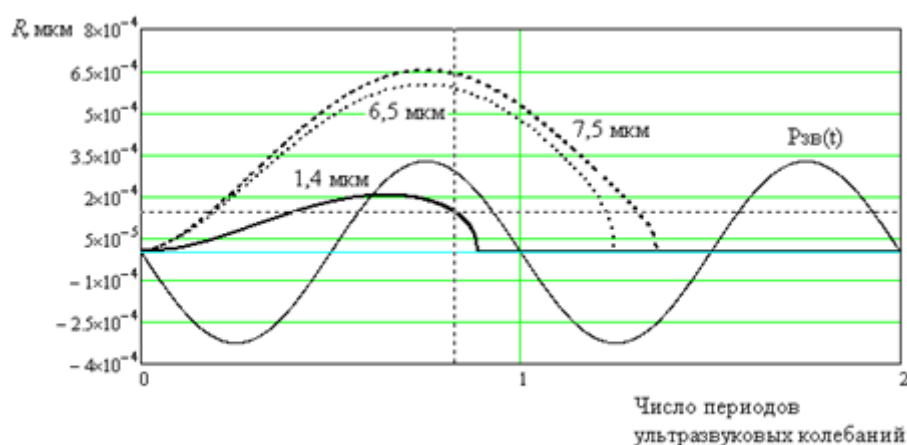


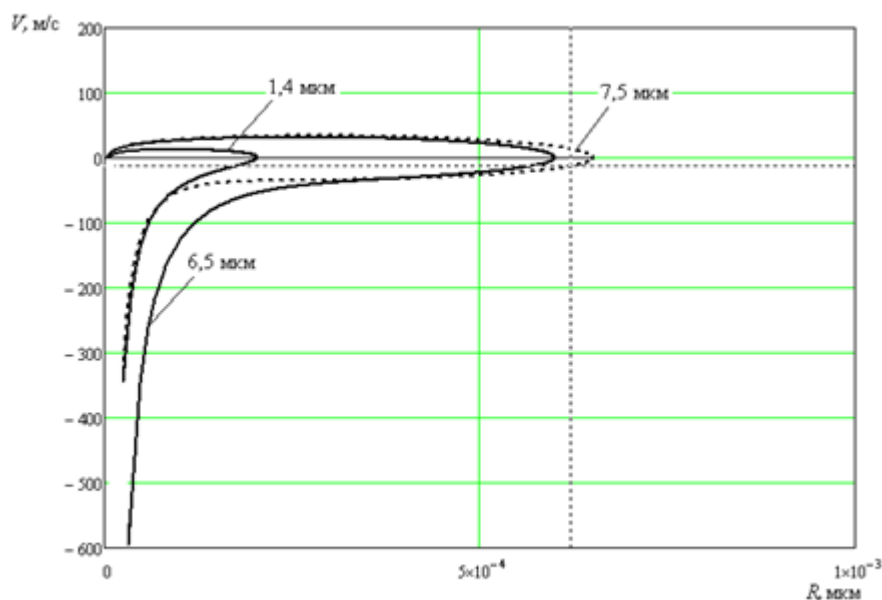
Рис. 1. Зависимость радиуса пузырька от времени при различных амплитудах звукового давления (пояснения в тексте); внизу показан гармонический закон изменения давления в звуковой волне

Скорость схлопывания пузырька, от которой зависит появление и энергия ударных волн, микротечений и кумулятивной струи, увеличивается тогда, когда фаза схлопывания пузырька совпадает с фазой сжатия звуковой волны, ускоряющей движение стенки пузырька, либо это схлопывание происходит в начале фазы разрежения, когда кинетическая энергия стенки, ускоренной в фазе сжатия звуковой волны, еще достаточно велика. Если же схлопывание происходит в конце фазы разрежения звуковой волны, то к

этому моменту звуковое поле уже длительное время противодействует сжатию и скорость схлопывания существенно падает. На рис. 2,а приведены результаты расчетов радиуса пузырька (26,5 кГц, $R_0=5$ мкм): при амплитуде 1,4 мкМ схлопывание пузырька происходит в фазе сжатия звукового поля, 6,5 мкМ – в начале фазы разрежения, 7,5 мкМ – в конце фазы разрежения звукового поля. На фазовых характеристиках этих пульсаций (рис. 2,б) видно, что максимальная скорость схлопывания при амплитуде 7,5 мкМ почти вдвое меньше скорости схлопывания при амплитуде 6,5 мкМ. С этим связывают наличие максимума скорости ультразвуковой очистки и др. Это условие в [1,7] сформулировано в виде $\tau_m \approx 0,5T$, где τ_m – время схлопывания пузырька, T – период ультразвуковой волны.



а)



б)

Рис. 2. Рассчитанные зависимости радиуса пузырька от времени $R(t)$ (а) и скорости стенки пузырька V от радиуса R (б) при различных амплитудах звукового давления $P_{zv}(t)$ (пояснения в тексте)

Параметры, характеризующие ультразвуковую кавитацию

Эффективность кавитации прежде всего зависит от следующих параметров [1]:

- скорости схлопывания;
- давления вблизи пузырьков в момент схлопывания;
- числа пузырьков в кавитационной области;
- энергии кавитации.

Следует отметить, что эти параметры могут быть в некоторых случаях рассчитаны, однако измерить их на практике затруднительно. Исключение составляют эксперименты со скоростной микрокиносъемкой, позволяющие проследить радиус одиночного пузырька, и эксперименты по определению числа пузырьков путем измерения объемной концентрации пузырьков (от 1% до 20%) дилатометрическим методом при погружении электроакустического преобразователя в объем кавитирующей жидкости [1].

Вместо числа пузырьков на практике чаще используют величину индекса кавитации, равного средней по времени объемной концентрации пузырьков:

$$K = \frac{\sum_i V_i}{V_{\text{ж}} + \sum_i V_i} \quad (1)$$

где $V_{\text{ж}}$ – объем жидкости без пузырьков, V_i – средний объем кавитационного пузырька, $i=1 \dots N$, N – число пузырьков.

Число пузырьков может быть выражено через индекс кавитации:

$$N = \rho V_{\text{ж}}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{3K}{4\pi R_{\text{cp}}^3}$ – концентрация пузырьков, R_{cp} – средний радиус пузырька, определяемый по кривым $R(t)$ (рис. 1).

Энергия кавитации [1] равна работе, затраченной на образование кавитационных пузырьков; она также равна энергии, выделяемой при их захлопывании и расходуемой на образование ударных волн и др.:

$$E_k \approx P \Delta V, \quad (3)$$

где P – гидростатическое давление, ΔV – объем всех пузырьков в фазе из наибольшего расширения.

Важно подчеркнуть, что зная форму пульсации $R(t)$ (рис. 1, 2), можно вычислить скорость схлопывания, энергию кавитации, оценить давление вблизи пузырька. Для определения формы пульсации необходимо знать фазу схлопывания пузырьков относительно звуковой волны. Таким образом, фаза схлопывания полностью характеризует перечисленные выше параметры за исключением числа пузырьков, для определения которого необходимо использовать дополнительные методы.

В настоящее время в литературе отсутствует информация о методах, позволяющих непосредственно определить форму пульсации или фазу схлопывания пузырьков.

Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации

Существующие методы контроля параметров кавитации можно разделить на три группы:

- методы, основанные на измерении параметров ультразвукового излучателя;
- методы, основанные на определении интенсивности кавитации по степени проявления одного из эффектов кавитации;
- методы, основанные на определении параметров пульсирующих пузырьков и кавитационной области, т.е. физических процессов, лежащих в основе действия кавитации.

Методы, основанные на измерении параметров ультразвукового излучателя

К данным методам относятся измерение амплитуды колебаний излучателя, измерения акустической мощности и электрической мощности, потребляемой преобразователем.

1. Измерение амплитуды колебаний излучателя

Амплитуда колебаний излучателя является основным параметром, определяющим параметры пульсаций кавитационных пузырьков [1,8,9]. Эта амплитуда определяет амплитуду звукового давления P_m , непосредственно действующего на пузырьки:

$$P_m = \rho_k c_k \omega A, \quad (4)$$

где ρ_k , c_k - плотность и скорость звука в кавитирующей жидкости, ω - круговая частота звуковой волны, A - амплитуда колебаний излучателя.

Однако кроме амплитуды колебаний излучателя на параметры пульсаций оказывают существенное значение и другие факторы, в частности, скорость звука в кавитационной области, расстояние от излучателя, температура и газосодержание жидкости, состав и концентрация растворенных примесей.

1) Падение скорости звука в суспензии газовых пузырьков в жидкости [1,9,12] может приводить к существенному уменьшению волнового сопротивления:

$$\rho_k c_k = \rho_0 c_0 \left[\frac{1}{1 + K \beta_{II} / \beta_0} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где K - индекс кавитации, β_{II} / β_0 - отношение сжимаемости парогазовой смеси в пузырьках к сжимаемости жидкости, для воды $\beta_{II} / \beta_0 \approx 10^4$.

Пузырьки, обладая высокой сжимаемостью, принимают на себя действие внешней силы в звуковой волне, тем самым уменьшая объемный модуль упругости E и скорость звука $c_k = \sqrt{E / \rho_k}$. Плотность кавитирующей среды при этом уменьшается незначительно из-за малой объемной концентрации пузырьков.

На рис. 3 показано рассчитанное по формуле (5) падение волнового сопротивления среды. Видно, что при индексе кавитации всего 0,2% волновое сопротивление и,

следовательно, амплитуда действующего на пузырьки звукового давления уменьшается почти в пять раз.

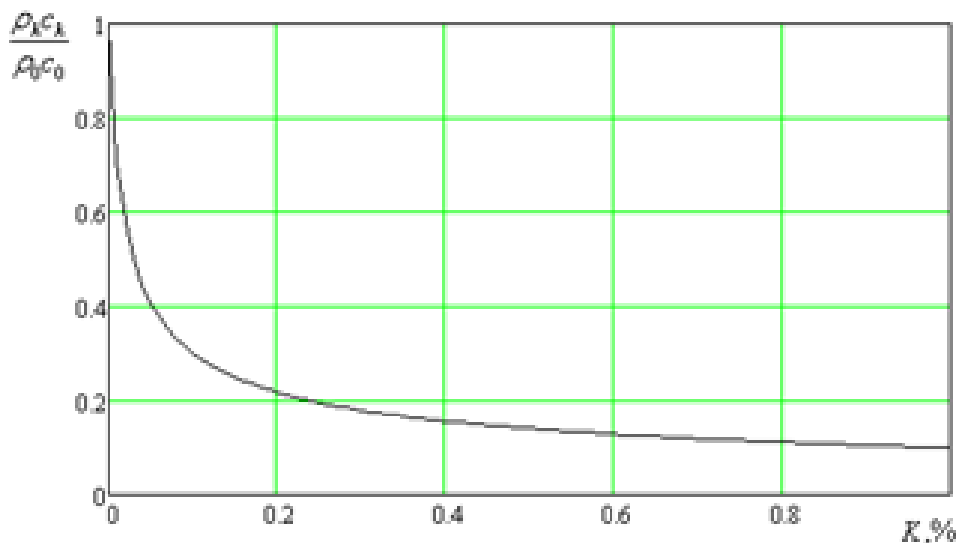


Рис. 3. Падение волнового сопротивления среды от индекса кавитации (пояснения в тексте)

2) Расстояние от излучателя. При удалении от излучателя амплитуда звукового давления уменьшается всего из-за того, что звуковые волны не являются плоскими, а также из-за влияния самой кавитационной области. Оно приводит к расходованию энергии звуковой волны на образование пузырьков и к экранированию распространения волны из-за градиента волнового сопротивления в кавитирующей среде (см. рис. 3). Этим объясняется формирование нижней границы кавитационного факела: когда амплитуда звукового давления становится ниже порога кавитации, она прекращается [1]. Расчеты показывают, что в воде при комнатной температуре на частоте 26,5 кГц порогу кавитации соответствует амплитуда излучателя примерно 0,4 мкм. Следовательно, при амплитуде излучателя 40 мкм при прохождении через кавитационную область высотой всего несколько см амплитуда звукового давления падает примерно в 100 раз.

Кроме того, на амплитуду звукового давления влияет расположение и свойства границ, которые могут приводить к образованию стоячих волн.

3) Температура влияет на многие параметры, входящие в уравнение пульсаций пузырьков. В [11] экспериментально показано, что интенсивность кавитации на частоте 34 кГц в деионизированной воде, определяемая по интенсивности акустического «белого» шума, изменяется более чем в 50 раз при изменении температуры воды от 20 °С до 60 °С, причем интенсивность кавитации зависит также от траектории нагрева и охлаждения (рис. 4).

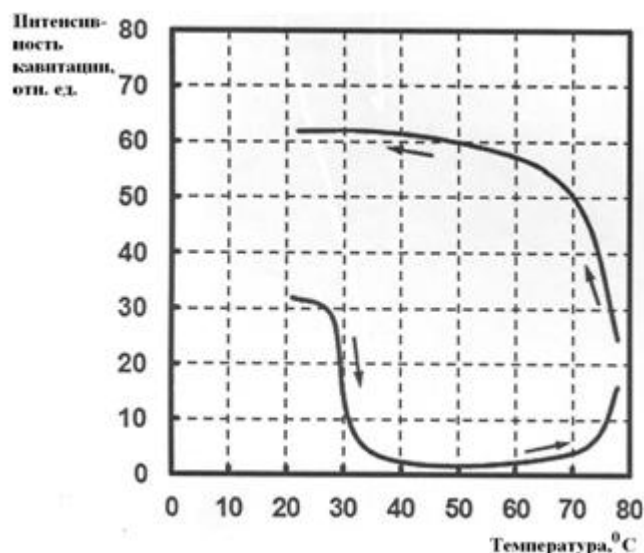


Рис. 4. Зависимость интенсивности кавитации от температуры при нагреве и последующем охлаждении [11]
(пояснения в тексте)

4) Газосодержание влияет на начальный равновесный радиус зародышей кавитации; чем оно ниже, тем выше скорость схлопывания и максимальное давление в звуковой волне [1]. При возбуждении кавитации в жидкости сначала происходит ее частичная дегазация с последующим изменением параметров пульсаций пузырьков. Таким образом, начальное газосодержание и история озвучивания жидкости также влияет на параметры ультразвуковой кавитации [11].

5) Состав и концентрация растворенных примесей влияют на параметры, входящие в уравнение пульсации пузырьков. Так, поверхностное натяжение значительно уменьшается (на десятки процентов) при растворении жирных кислот [13,14] и увеличивается при растворении солей, что согласно [15], в большинстве случаев увеличивает степень проявления кавитационных эффектов. Увеличение вязкости повышает порог кавитации, уменьшает максимальный радиус пузырьков и энергию кавитации, в то же время увеличивая скорость схлопывания пузырьков [7].

Таким образом, по одной только амплитуде колебаний излучателя невозможно судить о параметрах пульсаций кавитационных пузырьков. Использование амплитуды колебаний для количественного описания кавитационных эффектов имеет смысл при известных и неизменных параметрах среды, в противном случае она позволяет только сопоставлять эффекты, возникающие в сходных условиях.

2. Измерение акустической мощности

Акустическая мощность увеличивает количество пузырьков в кавитационной области, повышая эффективность кавитационных процессов [1]. С другой стороны, сама кавитационная область влияет на излучаемую акустическую мощность, так как уменьшение волнового сопротивления среды при возрастании индекса кавитации пропорционально уменьшает излучаемую акустическую мощность [16].

Сложность использования акустической мощности для перехода к параметрам пульсаций пузырьков состоит в том, что она расходуется не только на образование и пульсации пузырьков, но и на излучение звука, звукохимические реакции и акустические течения, при этом определить долю мощности, приходящуюся на кавитацию, затруднительно.

3. Измерение электрической мощности

Электрическая мощность, потребляемая электроакустическим преобразователем, используется во многих ультразвуковых установках как для подстройки в резонанс колебательной системы, так и для регулировки мощности кавитационного воздействия. Электрическая мощность $P_{эл}$ связана с акустической мощностью P_a соотношением [16,17]:

$$P_a = \eta_{эм} \eta_{ма} P_{эл}, \quad (6)$$

где $\eta_{эм}$, $\eta_{ма}$ - электромеханический и механоакустический КПД, зависящие от параметров электроакустического преобразователя, излучателя и среды.

Учитывая сложную опосредованную зависимость электрической мощности от акустической мощности и сложность определения параметров пульсаций пузырьков по акустической мощности, использование электрической мощности преобразователя имеет смысл только в качестве некоторого критерия для сопоставления результатов, полученных на одной и той же установке.

Методы определения интенсивности кавитации

Понятие «интенсивность кавитации» используют для количественной характеристики одного из кавитационных эффектов. Этот эффект выбирают исходя из удобства наблюдения или в связи с особенностями применения конкретного применения ультразвука. Так, в звукохимии интенсивность кавитации определяют по скорости звукохимических реакций или по интенсивности сонолюминесценции [2,18-21], по спектру сонолюминесценции [22], позволяющему оценить температуру в момент схлопывания пузырьков, в технологиях ультразвуковой очистки - по скорости разрушения образцов алюминия либо алюминиевой фольги (эрозионный тест) [1,2,24] или по мощности акустического кавитационного шума в широкой полосе частот [8,9,11, 23,25-26].

Главный недостаток всех этих методов заключается в том, что они не позволяют непосредственно связать степень выраженности регистрируемого эффекта с параметрами пульсаций кавитационных пузырьков. Такую связь можно проследить только гипотетически при использовании той или иной модели кавитационного воздействия на регистрируемый эффект. Учитывая зависимость пульсаций пузырьков от ряда других параметров, обычно не известных или трудно контролируемых, данные методы измерения

интенсивности кавитации не позволяют сопоставить результаты, полученные на различных установках или в различных условиях.

Методы определения параметров кавитационной области

К данной группе методов относятся методы прямого наблюдения, методы, основанные на определении амплитуд гармоник и субгармоник кавитационного шума и оптическом зондировании кавитационной области.

1. Методы прямого наблюдения (скоростная микрокиносъемка)

Самым убедительным методом получения информации о форме пульсаций кавитационных пузырьков является скоростная микрокиносъемка [1,20,26]. Она позволяет за каждый период ультразвуковых колебаний получить серию фотографий пузырька и непосредственно проследить изменение его радиуса во времени. Однако из-за поглощения и рассеяния в среде, а также сложности фокусировки этот метод не позволяет изучать пульсации пузырьков внутри кавитационной области. Качественное изображение удастся получить только для уединенных пульсирующих пузырьков либо для пузырьков на внешней границе кавитационной области. Практическому применению препятствует также сложность и высокая стоимость соответствующей аппаратуры.

2. Измерение амплитуд спектральных компонент акустического кавитационного шума

Акустический кавитационный шум возникает из-за переизлучения звука пульсирующими пузырьками и возбуждения ударных волн при схлопывании [1,2,26]. Звуковое давление можно рассчитать на основании закона изменения радиуса пузырька от времени [27]:

$$P(r,t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho}{r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} V(t) = \frac{1}{3} \frac{\rho}{t} \frac{\partial^2}{\partial t^2} [R(t)^3], \quad (7)$$

где ρ – плотность среды, V , R – объем и радиус пузырька, r – расстояние до приемника звука. Предполагается, что $r \ll R$.

Сложная форма пульсаций пузырьков $R(t)$ (рис. 1) порождает гармоники nf , $n=2,3,\dots$, и субгармоники $mf/2$, $mf/3$, $mf/4$ и др., $m=1,2,\dots$, основной частоты f излучателя. Появление в шуме субгармоник используется для обнаружения порога кавитации.

Дифференцирование в соответствии с (7) функции $R(t)$ на заключительном этапе схлопывания пузырьков (рис. 2,б) и возникающие в среде ударные волны порождают короткие импульсы звукового давления, проявляющиеся в спектре в виде «белого» шума. Мощность «белого» шума характеризует преимущественно процессы, сопровождающие схлопывание пузырьков.

Несмотря на то, что измерение кавитационного шума используется многими авторами и реализовано в серийных приборах [8,11,25-26], при этом обычно анализируются не спектральные компоненты, а мощность шума в некоторой полосе частот. Так, в [25] используется полоса от 5 кГц до 17,5 кГц при основной частоте колебаний 28,5 кГц, в [8] – полоса частот от 20-й до 40-й гармоники основной частоты.

В [28,29] показано, что амплитуды субгармоник позволяют определить фазу схлопывания пузырьков, форму пульсаций и по соотношению субгармоник найти амплитуду колебаний излучателя, соответствующую максимальной интенсивности кавитации. В описанных случаях достаточно анализировать субгармоники с частотами $1/3$ и $1/4$ от основной частоты излучателя. Субгармоники по сути не являются шумом, а характеризуют акустическое излучение, переизлучаемое пузырьками, и несут информацию о параметрах их пульсаций.

3. Оптическое зондирование кавитационной области

Оптическое зондирование является новым способом получения информации о параметрах пульсаций пузырьков [29-33]. Оптическое излучение от когерентного источника рассеивается на пульсирующих пузырьках и принимается фотоприемником, расположенным на одной оптической оси с источником. Кавитационная область выступает в качестве своеобразного акустооптического модулятора. Демодулированный сигнал фотодатчика содержит информацию о параметрах пульсаций пузырьков. В работе [34] изучалось также светорассеяние кавитационной области во временной и частотной области в полосе до 100 Гц для определения особенностей флуктуаций концентрации пузырьков.

Таким образом, перечисленные методы определения параметров кавитационной области имеют существенные преимущества перед остальными методами контроля ультразвуковой кавитации:

- позволяют получить информацию о форме и параметрах пульсаций кавитационных пузырьков, что принципиально важно для понимания механизмов, лежащих в основе того или иного кавитационного эффекта. Параметры пульсаций обусловлены всей совокупностью условий возбуждения кавитации и не требуют одновременного контроля амплитуды излучателя, температуры, состава среды и т.д. Параметры пульсаций являются универсальными физическими параметрами в отличие от параметров, характеризующих источник ультразвуковых колебаний и интенсивность кавитации;
- не оказывают влияния на кавитационную область и излучатель;
- являются практически безынерционными, позволяя на их основе организовать обратную связь и построить систему управления.

Методы анализа компонент кавитационного шума и оптического зондирования в силу достаточной простоты реализации позволяют определить форму пульсаций пузырьков, что необходимо для определения скорости схлопывания, индекса кавитации и других параметров кавитационной области.

Заключение

В результате анализа параметров ультразвуковой кавитации и существующих методов контроля кавитации определены методы, позволяющие получать информацию о параметрах пульсаций кавитационных пузырьков. Эта информация важна для:

- изучения механизмов действия кавитации;
- формирования количественных критериев эффективности действия кавитации на основе физических параметров самой кавитации, а не ее следствий;
- организации аппаратно-независимой обратной связи и построения автоматической системы управления процессами, использующими кавитацию.

В качестве таких методов обосновано применение метода регистрации спектральных компонент кавитационного шума и метода оптического зондирования ультразвуковой кавитационной области.

Список литературы

1. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 2. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. 267 с.
2. Маргулис М.А. Звухимические реакции и сонолюминесценция. М.: Химия, 1986. 288 с.
3. Миллер Э., Хилл К., Бэмбер Дж., Дикинсон Р., Фиш П., тер Хаар Г. Применение ультразвука в медицине: физические основы: пер. с англ. / ред. Л. Хилл. М.: Мир, 1989. 568 с.
4. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: учеб. пособие для вузов / под ред. С.И. Щукина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 222 с.
5. Саврасов Г.В. Технологии ультразвуковой хирургии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 36 с.
6. Маргулис М.А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, № 3. С. 263-287.
7. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
8. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Томаль В.С. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 2. С. 51-55
9. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Муллакаев М.С., Артемьев В.В. Анализ эффективности передачи ультразвуковых колебаний в нагрузку // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 6. С. 828-844.
10. Бэтчелор Г.К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика: сб. переводов иностр. ст. 1968. Т. 109, № 3. С. 65-84. [Batchelor G.K. Compression

- waves in a suspension of gas bubbles in liquid // Fluid Dynamics Transactions. Warszawa, 1967. Vol. 4. P. 425-445.].
11. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, iss. 1. P. 354-359.
 12. Overton G.D.N., Williams P.R., Trevena D.H. The influence of cavitation history and entrained gas on liquid tensile strength // Journal of Physics D: Applied Physics. 1984. Vol. 17, iss. 5. Article no. 012, pp. 979-987. DOI: [10.1088/0022-3727/17/5/012](https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/5/012)
 13. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
 14. Пасынский А.Г. Коллоидная химия: учеб. пособие / под ред. акад. В.А. Каргина. М.: Высшая школа, 1959. 265 с.
 15. Niemczewski B. Maximisation of cavitation intensity in ultrasonic cleaning in aqueous solutions through selection of salt solution // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2011. Vol. 89, iss. 2. P. 104-108.
 16. Маргулис И.М., Маргулис М.А. Измерение акустической мощности при исследовании кавитационных процессов // Акустический журнал. 2005. Т. 1, № 6. С. 802-812.
 17. Hueter T.F., Bolt R.H. Sonics. Techniques for the use of sound and ultrasound in engineering and science. N.Y.: John Wiley & Sons; London: Chapman & Hall, 1955. 456 p.
 18. Маргулис И.М., Маргулис М.А. О механизме свечения при акустической и лазерной кавитации // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 3. С. 340-350.
 19. Son E., Lim M., Khim J., Ashokkumar M. Acoustic emission spectra and sonochemical activity in a 36 kHz sonoreaktor // Ultrasonics Sonochemistry. 2012. Vol. 19, iss. 1. P. 16-21. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.06.001)
 20. Санкин Г.Н. Свечение при сферической фокусировке акустических импульсов // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 1. С. 105-116.
 21. Macedo R., Verhaagen B., Rivas D.F., Versluis M., Wesselink P., van der Sluis L. Cavitation measurement during sonic and ultrasonic activated irrigation // Journal of Endodontics. 2014. Vol. 40, iss. 4. P. 580-583.
 22. Suslick K.S., Eddingsaas N.C., Flannigan D.J., Hopkins S.D., Xu H. Extreme conditions during multi-bubble cavitation: Sonoluminescence as a spectroscopic probe // Ultrasonic Sonochemistry. 2011. Vol. 18, iss. 4. P. 842-846. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2010.12.012](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.12.012)
 23. Komarov S., Oda K., Ishiwata Y., Dezhkunov N. Characterization of acoustic cavitation in water and molten aluminum alloy // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20, iss. 2. P. 754-761. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2012.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.10.006)
 24. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970. 685 с.

25. Pereira A.H., Tirapelli C.B., Rodolpho L.A. Ultrasonic dental scaler performance assessment with an innovative cavitometer // American Journal of Applied Sciences. 2010. Vol. 7, iss. 3. P. 290-300.
26. Tzanakis I.A., Eskin D.G., Georgoulas A.B., Fytanidis D.K. Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, iss. 2. P. 866-878. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2013.10.003](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.10.003)
27. Sijl J., Vos H.J., Rozendal T., de Jong N., Lohse D., Versluis M. Combined optical and acoustical detection of single microbubble dynamics // Journal of the Acoustical Society of America. 2011. Vol. 130, iss. 5. P. 3271-3281.
28. Сковорцов С.П., Нечаев В.И. Определение интенсивности кавитации по параметрам кавитационного шума // 16-я Международная научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья»: матер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 34-36.
29. Сковорцов С.П., Нечаев В.И., Масленков Н.С., Кравченко А.П. Экспериментальное исследование модели пульсации пузырьков в ультразвуковой кавитационной области // 16-я Международная научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья»: матер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 36-38.
30. Сковорцов С.П., Змиевской Г.Н., Воронин А.А. Оптический контроль кавитационных эффектов низкочастотного ультразвука // 3-я Российская научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья»: матер. Ч.1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. С. 38.
31. Змиевской Г.Н., Ломакин А.А., Терешкина Д.В., Сковорцов С.П. Оптический контроль параметров кавитирующей среды в ультразвуковой хирургии // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2003. № 9. С. 18-25.
32. Змиевской Г.Н., Крылов Ю.В., Сковорцов С.П. Исследование возможностей оптического зондирования кавитирующей жидкости при ультразвуковом воздействии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2006. № 10. С. 32-36.
33. Zmievskey G., Skvortsov S. Ultrasound Cavitation Detection by Means of Optical Probing // Proceedings of 6th Russian-Bavarian Conference on Biomedical Engineering. Moscow, 2010. P. 121-122.
34. Скоков В.Н., Решетников А.В., Виноградов А.В., Коверда В.П. Динамика флуктуаций и 1/f спектры при акустической кавитации жидкостей // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 2. С. 168-172.

Techniques of Ultrasound Cavitation Control

S.P. Skvortsov^{1,*}

^{*}bmt203@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: ultrasound cavitation, cavitation bubbles, pulsations, cavitation intensity, control, optical probing, laser, cavitation noise, subharmonics, acoustic power, sonochemistry, sonoluminescence

The control methods of ultrasonic cavitation applied now within the range from 20 kHz to 80 kHz use either control of ultrasound source parameters (amplitude, acoustic power, etc.) or control of one of the cavitation effects (erosion of materials, sonoluminescence, power of acoustic noise, etc.). These methods provide effective management of technological processes, however, make it impossible to relate the estimated effect with parameters of pulsations of cavitation bubbles. This is, mainly, due to influence of a number of uncontrollable parameters, in particular, such as temperature, composition of liquid, gas content, etc. as well as because of the difficulty to establish interrelation between the estimated effect and parameters of pulsations. As a result, in most cases it is difficult to compare controlled parameters of ultrasonic cavitation among themselves, and quantitative characteristics of processes become depending on the type of ultrasonic installation and conditions of their measurement.

In this regard, methods to determine parameters of bubble pulsations through sounding a cavitation area by low-intensity laser radiation or to record cavitation noise sub-harmonics reflecting dynamics of changing radius of cavitation bubbles are of interest.

The method of optical sounding, via the analysis of spectral components of a scattered signal recorded by a photo-detector, allows us to define a phase of the bubbles collapse with respect to the sound wave and a moving speed of the bubbles wall, as well as to estimate a cavitation index within the light beam section. The method to record sub-harmonics of cavitation noise allows us to define parameters of pulsations, average for cavitation areas.

The above methods allow us both to study mechanisms of cavitation action and to form quantitative criteria of its efficiency based on the physical processes, rather than their consequences and are convenient for arranging a feedback in the units using ultrasonic cavitation.

References

1. Rozenberg L.D., ed. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka. V 3 t. T. 2. Moshchnye ul'trazvukovye polya* [Physics and Technics of High Intensity Ultrasound. In 3 vols. Vol. 2. High Intensity Ultrasound Fields]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 267 p. (in Russian).

2. Margulis M.A. *Zvukokhimicheskie reaktsii i sonoluminestsentsiya* [Sound induced chemical reactions and sonoluminescence]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 288 p. (in Russian).
3. Hill C.R., ed. *Physical Principles of Medical Ultrasonics*. Chichester, UK, Ellis Horwood Limited, 1986. 282 p. (Russ. ed.: Hill C.R., ed. *Primenenie ul'trazvuka v meditsine: fizicheskie osnovy*. Moscow, Mir Publ., 1989. 568 p.).
4. Akopyan V.B., Ershov Yu.A. *Osnovy vzaimodeistviya ul'trazvuka s biologicheskimi ob"ektami* [Foundations of Ultrasound – Biological Tissues Interaction]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 222 p. (in Russian).
5. Savrasov G.V. *Tekhnologii ul'trazvukovoi khirurgii* [Ultrasound Surgery Techniques]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 36 p. (in Russian).
6. Margulis M.A. Sonoluminescence. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2000, vol. 170, no. 3, pp. 263-287. (English version of journal: *Physics-Uspekhi*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 259-282. DOI: [10.1070/PU2000v043n03ABEH000455](https://doi.org/10.1070/PU2000v043n03ABEH000455))
7. Keller O.K., Kratysh G.S., Lubyanskii G.D. *Ul'trazvukovaya ochestka* [Ultrasound Cleaning]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 184 p. (in Russian).
8. Lanin V.L., Dezhkunov N.V., Tomal' V.S. Instrument maintenance of ultrasonic influences parameters measurement in technological processes. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature = Technology and design of electronic equipment*, 2008, no. 2, pp. 51-55. (in Russian).
9. Abramov O.V., Abramov V.O., Mullakaev M.S., Artem'ev V.V. The efficiency of ultrasonic oscillations transfer into the load. *Akusticheskii zhurnal*, 2009, vol. 55, no. 6, pp. 828-844. (English version of journal: *Acoustical Physics*, 2009, vol. 55, no. 6, pp. 894-909. DOI: [10.1134/S10637711009060244](https://doi.org/10.1134/S10637711009060244)).
10. Batchelor G.K. Compression waves in a suspension of gas bubbles in liquid. *Fluid Dynamics Transactions*. Warszawa, 1967, vol. 4, pp. 425-445.
11. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, vol. 21, iss. 1, pp. 354-359.
12. Overton G.D.N., Williams P.R., Trevena D.H. The influence of cavitation history and entrained gas on liquid tensile strength. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1984, vol. 17, iss. 5, article no. 012, pp. 979-987. DOI: [10.1088/0022-3727/17/5/012](https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/5/012)
13. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M., et al. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Physical Magnitudes: Reference Book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (in Russian).
14. Pasynskii A.G. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid Chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1959. 265 p. (in Russian).
15. Niemczewski B. Maximisation of cavitation intensity in ultrasonic cleaning in aqueous solutions through selection of salt solution. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2011, vol. 89, iss. 2, pp. 104-108.

16. Margulis I.M., Margulis M.A. Measurement of acoustic power in studying cavitation processes. *Akusticheskii zhurnal*, 2005, vol. 1, no. 6, pp. 802-812. (English version of journal: *Acoustical Physics*, 2005, vol. 51, no. 6, pp. 695-704. DOI: [10.1134/1.2130901](https://doi.org/10.1134/1.2130901)).
17. Hueter T.F., Bolt R.H. Sonics. *Techniques for the use of sound and ultrasound in engineering and science*. N.Y., John Wiley & Sons; London, Chapman & Hall, 1955. 456 p.
18. Margulis I.M., Margulis M.A. Luminescence mechanism of acoustic and laser-induced cavitation. *Akusticheskii zhurnal*, 2006, vol. 52, no. 3, pp. 340-350. (English version of journal: *Acoustical Physics*, 2006, vol. 52, no. 3, pp. 283-292. DOI: [10.1134/S1063771006030080](https://doi.org/10.1134/S1063771006030080)).
19. Son E., Lim M., Khim J., Ashokkumar M. Acoustic emission spectra and sonochemical activity in a 36 kHz sonoreaktor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, iss. 1, pp. 16-21. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.06.001)
20. Sankin G.N. Cavitation under spherical focusing of acoustic pulses. *Akusticheskii zhurnal*, 2006, vol. 52, no. 1, pp. 105-116. (English version of journal: *Acoustical Physics*, 2006, vol. 52, no. 1, pp. 93-103. DOI: [10.1134/S1063771006010131](https://doi.org/10.1134/S1063771006010131)).
21. Macedo R., Verhaagen B., Rivas D.F., Versluis M., Wesselink P., van der Sluis L. Cavitation measurement during sonic and ultrasonic activated irrigation. *Journal of Endodontics*, 2014, vol. 40, iss. 4, pp. 580-583.
22. Suslick K.S., Eddingsaas N.C., Flannigan D.J., Hopkins S.D., Xu H. Extreme conditions during multi-bubble cavitation: Sonoluminescence as a spectroscopic probe. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2011, vol. 18, iss. 4, pp. 842-846. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2010.12.012](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.12.012)
23. Komarov S., Oda K., Ishiwata Y., Dezhkunov N. Characterization of acoustic cavitation in water and molten aluminum alloy. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, vol. 20, iss. 2, pp. 754-761. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2012.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.10.006)
24. Rozenberg L.D., ed. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka. V 3 t. T. 3. Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physics and Technics of High Intensity Ultrasound. In 3 vols. Vol. 3. Physical Fundamentals of Ultrasound Technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 685 p. (in Russian).
25. Pereira A.H., Tirapelli C.B., Rodolpho L.A. Ultrasonic dental scaler performance assessment with an innovative cavitometer. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 7, iss. 3, pp. 290-300.
26. Tzanakis I.A., Eskin D.G., Georgoulas A.B., Fytanidis D.K. Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, vol. 21, iss. 2, pp. 866-878. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2013.10.003](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.10.003)
27. Sijl J., Vos H.J., Rozendal T., de Jong N., Lohse D., Versluis M. Combined optical and acoustical detection of single microbubble dynamics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, vol. 130, iss. 5, pp. 3271-3281.
28. Skvortsov S.P., Nechaev V.I. Cavitation intensity measurement by means of cavity noise spectra analysis. 16-ya *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Mediko-*

- tekhnicheskie tekhnologii na strazhe zdorov'ya*": mater. [Proc. of the 16th International Scientifical and Engineering Conference "Medical and Engineering techniques for health guarding"]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 34-36. (in Russian).
29. Skvortsov S.P., Nechaev V.I., Maslenkov N.S., Kravchenko A.P. Experimental study of bubble dynamics in ultrasound cavitation area. *16-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Mediko-tekhnicheskie tekhnologii na strazhe zdorov'ya": mater.* [Proc. of the 16th International Scientifical and Engineering Conference "Medical and Engineering techniques for health guarding"]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 36-38. (in Russian).
 30. Skvortsov S.P., Zmievskoi G.N., Voronin A.A. Low-frequency cavitation effects optical control. *3-ya Rossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Mediko-tekhnicheskie tekhnologii na strazhe zdorov'ya": mater. Ch.1.* [Proc. of the 3rd International Scientifical and Engineering Conference "Medical and Engineering techniques for health guarding". Pt. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001, p. 38. (in Russian).
 31. Zmievskoi G.N., Lomakin A.A., Tereshkina D.V., Skvortsov S.P. Cavitation area optical control in ultrasound surgery. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2003, no. 9, pp. 18-25. (in Russian).
 32. Zmievskoi G.N., Krylov Yu.V., Skvortsov S.P. Cavitation Parameters Measurements Potential Possibilities Research by Means of Optical Testing in Ultrasound Surgery and Therapy. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2006, no. 10, pp. 32-36. (in Russian).
 33. Zmievskoy G., Skvortsov S. Ultrasound Cavitation Detection by Means of Optical Probing. *Proceedings of the 6th Russian-Bavarian Conference on Biomedical Engineering*. Moscow, 2010, pp. 121-122.
 34. Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V., Koverda V.P. Fluctuation dynamics and 1/f spectra characterizing the acoustic cavitation of liquids. *Akusticheskii zhurnal*, 2007, vol. 53, no. 2, pp. 168-172. (English version of journal: *Acoustical Physics*, 2007, vol. 53, no. 2, pp. 136-140. DOI: [10.1134/S1063771007020042](https://doi.org/10.1134/S1063771007020042)).