

УДК 534.6

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

© 2020 г. Р. В. Козабаранов<sup>а</sup>, В. А. Борисенко<sup>а, \*</sup>, И. Н. Диденкулов<sup>б, с</sup>, А. С. Буркацкий<sup>а</sup>,  
А. С. Егоров<sup>а</sup>, Д. А. Литвинов<sup>а</sup>, В. В. Чернов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ,  
ул. Духова 6, Саров, Нижегородской обл., 607182 Россия

<sup>б</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук,  
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603155 Россия

<sup>с</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
пр. Гагарина 23, Нижний Новгород, 603022 Россия

\*e-mail: VABorisenok@mephi.ru

Поступила в редакцию 03.06.2019 г.

После доработки 09.10.2019 г.

Принята к публикации 29.10.2019 г.

Приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования цилиндрического резонатора для получения сонолюминесценции, изготовленного целиком из пьезокерамики. Представлены данные о получении и исследовании одно- и многопузырьковой сонолюминесценции в системе вода–воздух. Показано, что условия для возникновения сонолюминесценции создаются в пьезокерамическом резонаторе при электрических напряжениях, значения которых меньше на порядок величины, чем в резонаторах других типов.

*Ключевые слова:* пьезокерамический резонатор, сонолюминесценция

**DOI:** 10.31857/S0320791920020045

### ВВЕДЕНИЕ

Сонолюминесценция (СЛ) — явление импульсного излучения света пузырьками газа (пара, паровой смеси) в жидкости под действием акустического поля [1–3]. Согласно литературным данным [1–3], получение и исследование СЛ, в основном, проводят с помощью сферических или цилиндрических резонаторов. Резонаторы изготавливают из стекла, заполняют рабочей жидкостью с растворенным в ней газом. Волновой процесс в жидкости возбуждают двумя или большим количеством пьезоэлектрических элементов, закрепленных попарно в диаметрально противоположных точках экватора сферического резонатора или на торцевых крышках цилиндрического резонатора. Для последнего, в ряде случаев, используют небольшой кольцевой пьезоэлемент [4]. Для получения необходимой амплитуды акустического поля при возбуждении таких резонаторов приходится прикладывать высокое напряжение к пьезокерамическим элементам. Кроме того, наличие дополнительных масс в виде пьезокерамических элементов на стенках колбы искажает сферически-симметричные моды колебаний.

В настоящей работе приведены результаты исследования цилиндрического резонатора, изготовленного целиком из пьезокерамики. Особенностью такого резонатора является то, что акустические волны в жидкости возбуждаются движением всей поверхности стенки, что может привести к созданию своеобразной волновой картины. Вследствие большой площади поверхности пьезокерамики в таком резонаторе легче возбудить акустические волны необходимой амплитуды при существенно меньших прикладываемых электрических напряжениях. Кроме того, в таком резонаторе по сравнению с классической схемой стеклянного резонатора с приклеенными небольшими пьезокерамическими элементами легче возбудить симметричные моды колебаний, необходимые для наблюдения СЛ.

Исследован резонатор, изготовленный из пьезокерамики системы цирконата-титаната бария-свинца марки ЦТБС-3 со следующими размерами: внутренний диаметр — 65.5 мм, толщина стенки — 4.7 мм, высота — 49.8 мм. Цилиндрические поверхности покрыты электродами из воздушного серебра толщиной ~10 мкм. Пьезокерамика поляризована по радиусу. Электрическая емкость резонатора 49 нФ (на частоте  $f = 1$  кГц). Нижний торец резонатора закрыт крышкой из силикатного стекла толщиной 4 мм.

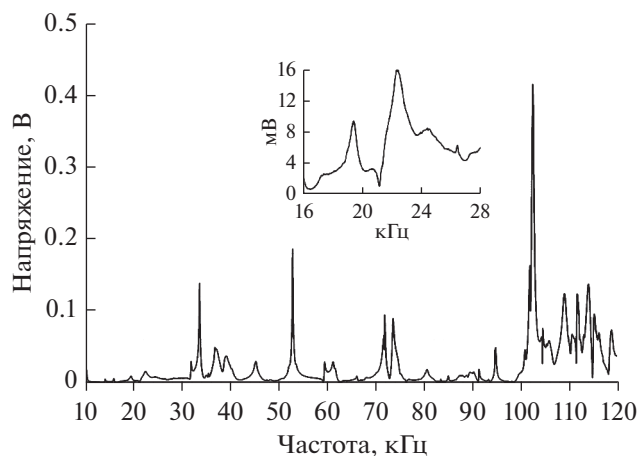


Рис. 1. Частотная характеристика резонатора.

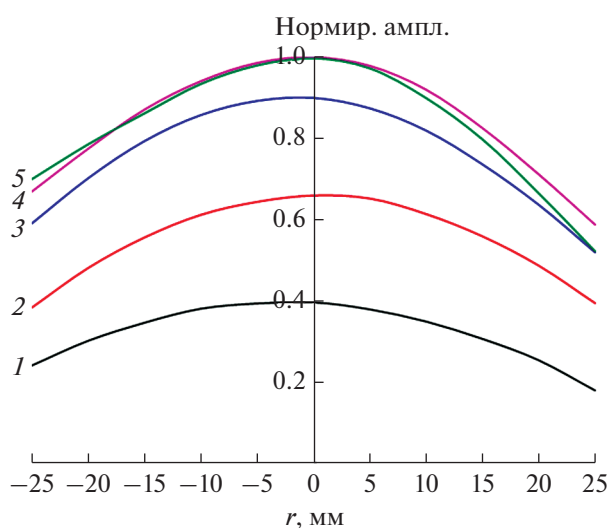


Рис. 2. Нормированные радиальные профили амплитуды давления в цилиндрическом резонаторе на частоте 19.08 кГц на глубинах от поверхности воды: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20, 5 – 25 мм.

Проведено численное моделирование работы резонатора, измерен ряд его характеристик, проведены эксперименты по получению и измерению некоторых характеристик однопузырьковой (ОПСЛ) и многопузырьковой (МПСЛ) сонолюминесценции в системе вода–воздух.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА

Измерена частотная характеристика резонатора и распределение акустического давления по его объему. Для проведения исследований использована экспериментальная установка, в состав которой входили: генератор Tektronix AFG 3102C; усилитель мощности AR350AH1 со спек-

тральным диапазоном 10 Гц–1 МГц; пьезокерамический резонатор, заполненный жидкостью, высота столба которой 40 мм; игольчатый гидрофон фирмы Precision Acoustics, с размером рабочей части  $\varnothing 1.0 \times 30$  мм и спектральным диапазоном 10 кГц–60 МГц; цифровой осциллограф Le Croy WR625Zi с полосой пропускания 2.5 ГГц.

Опыты по измерению частотной характеристики проведены с дегазированной дистиллированной водой в диапазоне частот 0–120 кГц. Для всех экспериментов воду дегазировали до концентрации растворенного кислорода ~20% от его концентрации при нормальных условиях. Для дегазации использовали установку, состоящую из форвакуумного насоса, соединенного с герметичным сосудом. Мерой дегазации служила концентрация кислорода, измеренная кислородомером АТЕ-3012. После дегазации вода охлаждалась до температуры 5–7°C. Измерительный гидрофон размещался вертикально по оси цилиндра, его чувствительный элемент находился на глубине 20 мм. На резонатор подавалось напряжение синусоидальной формы амплитудой ~10 В. Результаты измерений частотной характеристики приведены на рис. 1.

На частотной характеристике во всем диапазоне частот видно множество резонансов. На вкладке более подробно представлен диапазон 16–28 кГц. Было установлено, что на частоте 19.08 кГц имеется резонанс, при котором обеспечивается один максимум в центре резонатора. Этот резонанс соответствует основной радиальной моде. Дальнейшая работа проводилась на этой резонансной частоте, так как данная мода создает условия для левитации и сонолюминесценции одиночного пузырька в центре нашего резонатора. Более высокочастотные резонансы соответствуют более высоким радиальным, азимутальным и глубинным модам.

Измерения распределения амплитуды (профиля) давления в резонаторе проводили на выбранной резонансной частоте 19.08 кГц. В опытах гидрофон перемещали вдоль диаметральной линии с помощью специального устройства с шагом 5 мм. Результаты измерений приведены на рис. 2.

Численное моделирование акустического поля в резонаторе проводилось методом конечных элементов с помощью программного комплекса Comsol, ver 5.2a, с использованием модулей Multiphysics, Solid mechanics, Acoustics, MEMS (микроэлектромеханические структуры, керамика). Расчет велся на осесимметричной модели, тип расчета – гармонический анализ (Frequency domain). Шаг сетки 3 мм, сетка треугольная. Расчет проводился для резонатора с реальными размерами для параметров пьезокерамики ЦТБС-3.

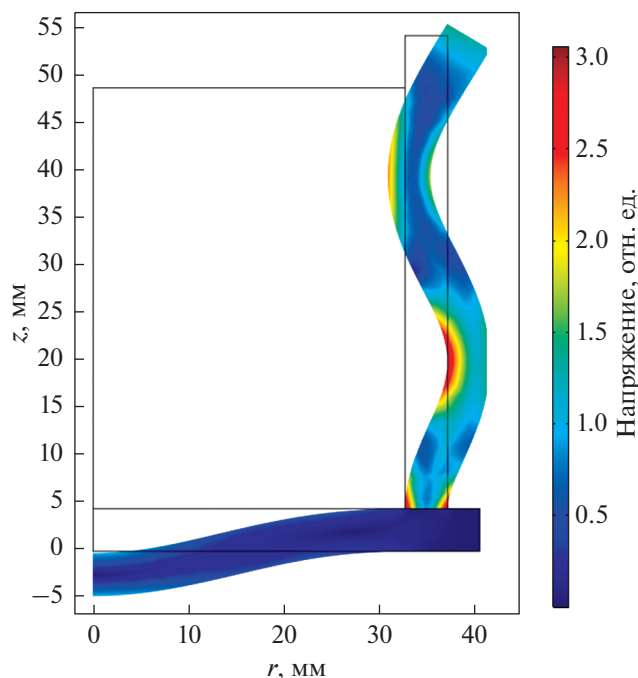


Рис. 3. Вид расчетных колебаний стенок и дна резонатора на частоте 19.88 кГц.

В рамках расчета основной резонанс получился на частоте 19880 Гц, что немного отличается от экспериментально найденного резонанса на частоте 19080 Гц. Вид колебаний стенок резонатора на этой частоте приведен на рис. 3. Из рисунка можно сделать вывод о том, что цилиндрическая пьезокерамическая стенка резонатора совершает изгибные колебания, соответствующие второй моде, при этом стеклянное дно колеблется на первой моде. Связь этих мод осуществляется посредством слоя воды, заполняющего резонатор.

Структура поля давления в водном слое на этой резонансной частоте показана на рис. 4, из которого следует, что примерно в центре водного слоя формируется максимум амплитуды акустического поля. Акустическое поле убывает как при приближении к цилиндрической стенке, так и при приближении к поверхности и дну водного слоя.

На рис. 5 приведены рассчитанные радиальные профили амплитуды акустического поля в диаметральной плоскости резонатора на глубинах от 5 до 25 мм с шагом 5 мм, которые качественно соответствуют экспериментальным профилям на рис. 2.

Численное моделирование показало, что в акустическом резонаторе на основной резонансной частоте за счет связанных сложных колебаний пьезокерамической стенки и стеклянного дна формируется акустическое поле, имеющее максимум в центре водного слоя. В таком акустическом поле на маленький пузырек, резонансная

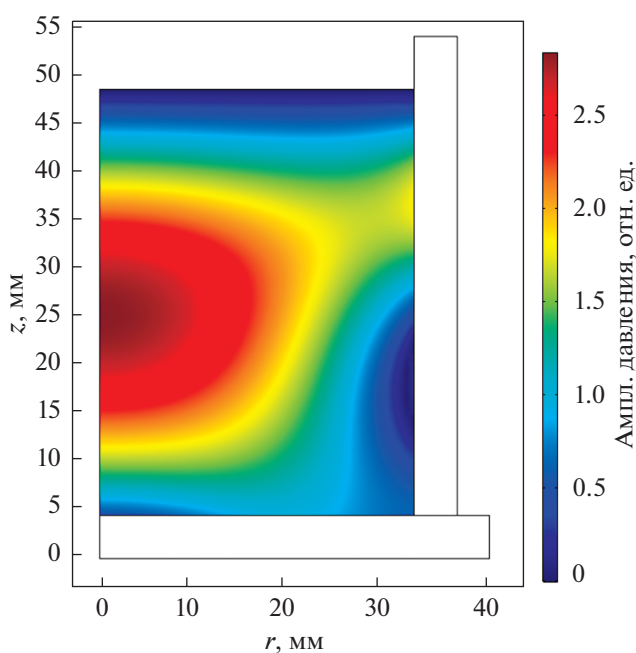


Рис. 4. Структура поля акустического давления в резонаторе на частоте 19.88 кГц.

частота которого выше частоты акустического поля, действует сила радиационного давления, втягивающая его в центр резонатора и удерживающая его там. Таким образом, в резонаторе существуют условия для наблюдения сонолюминесценции одиночного пузырька.

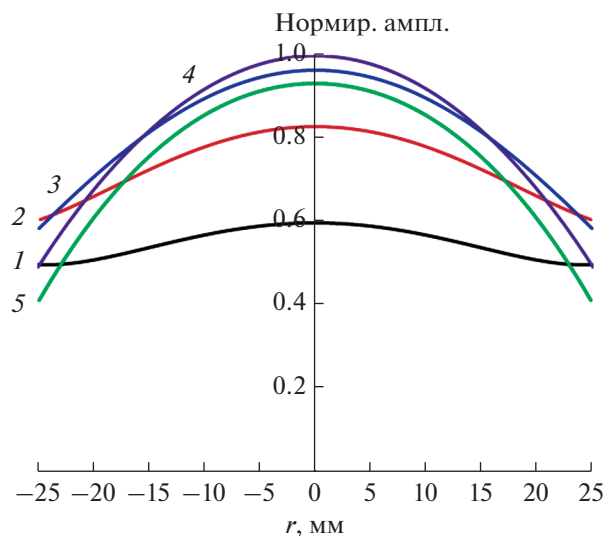


Рис. 5. Нормированные радиальные профили амплитуды давления в цилиндрическом резонаторе на частоте 19.08 кГц на глубинах от поверхности воды: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20, 5 – 25 мм.



Рис. 6. Фотография светящегося пузырька.

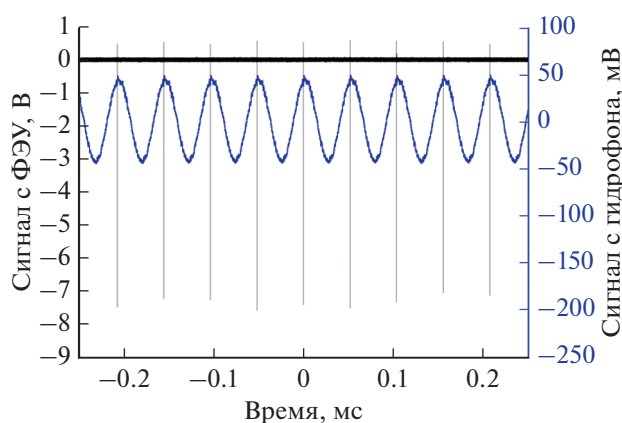


Рис. 7. Результат измерений сигналов с гидрофона и ФЭУ (ОПСЛ).

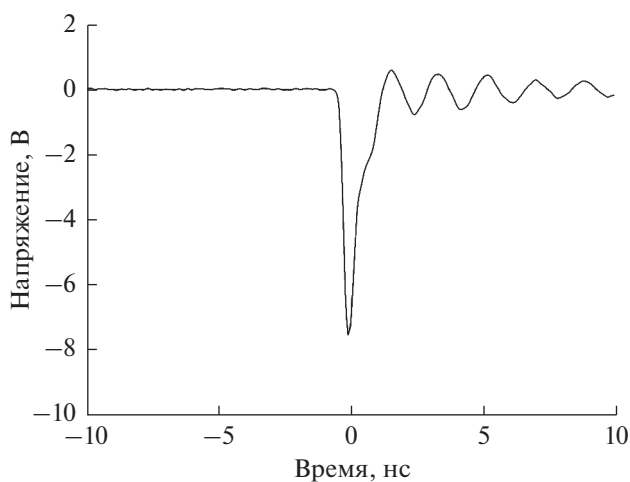


Рис. 8. Форма импульса с ФЭУ.

### 3. ПОЛУЧЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЕ ОДНОПУЗЫРЬКОВОЙ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

В исследуемом резонаторе получена как однопузырьковая (ОПСЛ), так и многопузырьковая (МПСЛ) сонолюминесценция.

Для получения ОПСЛ использовали дистиллированную воду с удельным сопротивлением  $\sim 350$  кОм см при нормальных условиях. Пузырек формировали следующим образом. На резонатор подавали синусоидальное напряжение резонансной частоты  $\sim 19$  кГц амплитудой 5 В. Далее возмущали поверхность воды падением капли. При этом образовывались несколько пузырьков, которые устремлялись к центру резонатора и объединялись в один стабильный пузырек. Путем увеличения амплитуды возбуждающего сигнала до 50 В и тонкой подстройки частоты получали режим сонолюминесценции. Фотография светящегося пузырька приведена на рис. 6. Пузырек голубого цвета хорошо виден невооруженным глазом в затемненном помещении.

Для возбуждения резонатора использовали генератор Tektronix AFG 3102С, усилитель мощности AR 350АН1А и трансформатор IT1003 фирмы Amplifier Research. В течение всего опыта акустическое давление в жидкости мониторировали гидрофоном. Импульсы излучения регистрировали ФЭУ ТНФТ25-02 (спектральный диапазон 200–800 нм, временное разрешение  $\sim 1$  нс, диаметр фотокатода 25 мм), установленным у открытого верхнего торца резонатора, и осциллографом Le Croy 625Zi. Результат измерений приведен на рис. 7. Форма импульса с ФЭУ дана на рис. 8.

Осциллограммы сигналов (рис. 7) показывают, что в пьезокерамическом резонаторе получена стабильная однопузырьковая сонолюминесценция. Вспышка света генерируется в каждом акустическом цикле в момент времени, практически совпадающий с моментом максимума давления. В данном опыте амплитуда сигнала с ФЭУ составляет  $\sim 7$  В. Осциллограмма формы сигнала (рис. 8) указывает на то, что временное разрешение измерительного канала недостаточно для регистрации импульса излучения без искажения. Отметим, что для получения ОПСЛ в пьезокерамическом резонаторе на его обкладки нужно подать напряжение  $\sim 50$  В, что значительно меньше, чем в случае стеклянных резонаторов. В последнем случае на пьезоэлементы подают напряжение  $\sim 700$  В.

Спектр излучения измерялся спектрометром Ocean Optics QE Pro (спектральный диапазон 200–800 нм). Излучение транслировалось по оптическому каналу, состоящему из кварцевой линзы диаметром 25 мм и кварцевого волокна диаметром 0.6 мм и длиной 1 м. Канал был протестирован с использованием дейтериевой лампы Ocean

Optics P-2000 и “точечного” источника света: фотодиод и малое отверстие. Юстировка оптической системы проводилась с помощью лазера, включенного в оптический канал со стороны спектрометра. Результаты измерений приведены на рис. 9.

Серия измерений спектров, показанных на рис. 9, проведена с одним и тем же пузырьком в течение времени  $\sim 5$  мин. Максимальная интенсивность получена в первом измерении. Во время эксперимента температура воды постепенно увеличивалась, что, по нашему мнению, привело к уменьшению интенсивности излучения. Измеренный спектр по форме отличается от аналогичных измерений в работах [5, 6]. В [5] измерения проведены при акустических давлениях, близких к верхнему порогу области стабильности пузырька для получения максимальной яркости источника. Зарегистрированный в работе [5] спектр представляет собой гладкую кривую, растущую с уменьшением длины волны  $\lambda$  вплоть до  $\lambda = 200$  нм. В работе [6] при амплитудах акустического давления, близких к нижнему порогу области стабильности, авторы наблюдали в спектре системы вода–воздух линии ОН и ряд других линий, природа которых в [5] не определена. Возможно, в нашем случае получено некоторое промежуточное состояние системы, о чем свидетельствуют наличие в спектре слабой линии гидроксил-радикала ( $\lambda = 310$  нм) и другой линии ( $\lambda = 320$  нм).

Для определения влияния чистоты используемой воды на измерение спектра СЛ с помощью спектрофлуориметра СМ2203 (фирма Солар, Беларусь, спектральный диапазон 220–1100 нм) был определен коэффициент ее пропускания. Эти данные приведены на рис. 10.

Результаты измерений коэффициента оптического пропускания воды относительно воздуха, приведенные на рис. 10, демонстрируют, что эта характеристика воды практически не приводит к искажению спектра излучения СЛ.

#### 4. ПОЛУЧЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЕ МНОГОПУЗЫРЬКОВОЙ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Многопузырьковая сонолюминесценция наблюдалась в этом же резонаторе. При постепенном увеличении возбуждающего напряжения по достижении в резонаторе давлений, превышающих порог кавитации, в ней образовывались пузырьки, которые начинали излучать свет, т.е. реализовывалось явление многопузырьковой сонолюминесценции. В этих опытах использовалась недегазированная дистиллированная вода при температуре  $5.3^\circ\text{C}$ . Частота акустического поля составляла 33 кГц. На этой частоте, соответствующей другому, более сильному резонансу акустического поля, легко обеспечивался режим кавита-

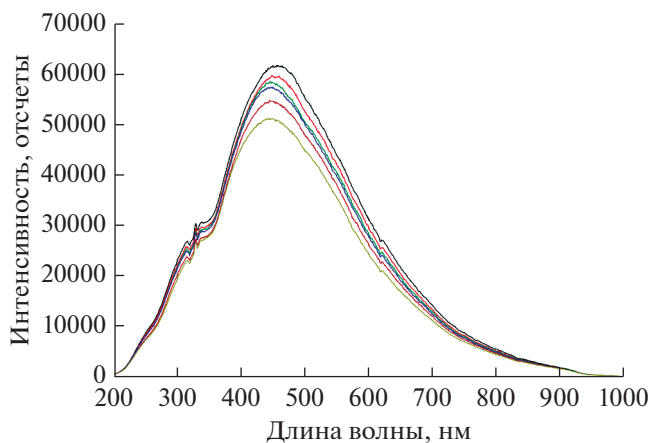


Рис. 9. Спектр однопузырьковой сонолюминесценции.

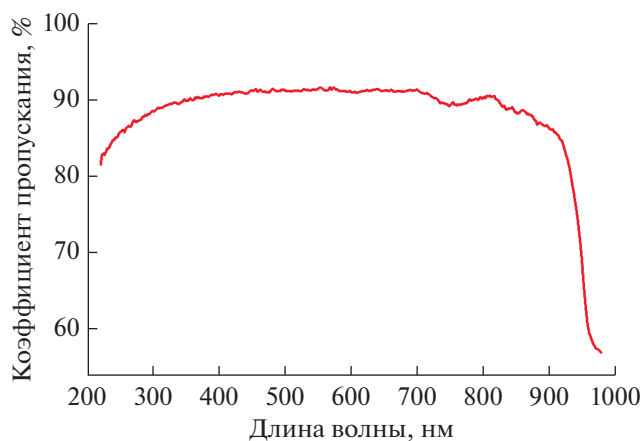


Рис. 10. Коэффициент пропускания воды относительно воздуха.

ции. Импульсы излучения МПСЛ регистрировались с помощью того же метода, что и ОПСЛ. Результаты измерений при двух значениях напряжения на резонаторе приведены на рис. 11 и 12. В опыте, соответствующем рис. 12, гидрофон не использовали из-за опасности его кавитационного повреждения. Отметим, что при кавитационном процессе часть пузырьков появляется вблизи стенок резонатора. В этом случае характер их колебаний может отличаться от монополярных [7], хотя в данных экспериментах детально наблюдать форму колебаний пузырьков не удалось.

Анализ осциллограмм показывает, что в экспериментах получена стабильная МПСЛ в недегазированной воде. Отметим, что амплитуды сигналов с ФЭУ не превышают 150 мВ. Это значительно меньше, чем в случае ОПСЛ. Недегазированная вода была выбрана из-за более низкого порога кавитации. Импульсы сонолюминесценции возникают при схлопывании пузырьков, а количество

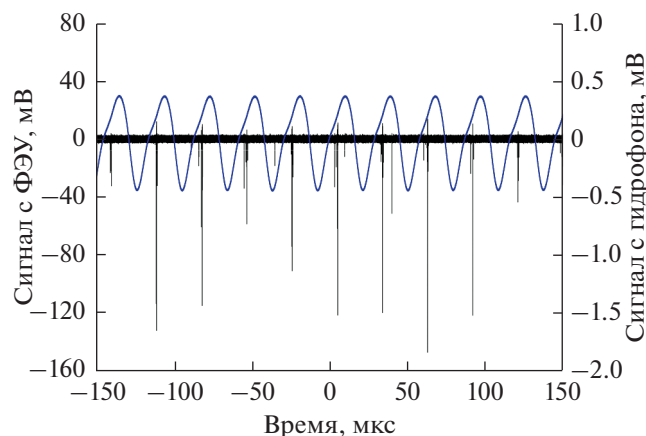


Рис. 11. Оциллограмма сигналов с гидрофона и с ФЭУ при наблюдении МПСЛ. Напряжение на резонаторе 84 В.

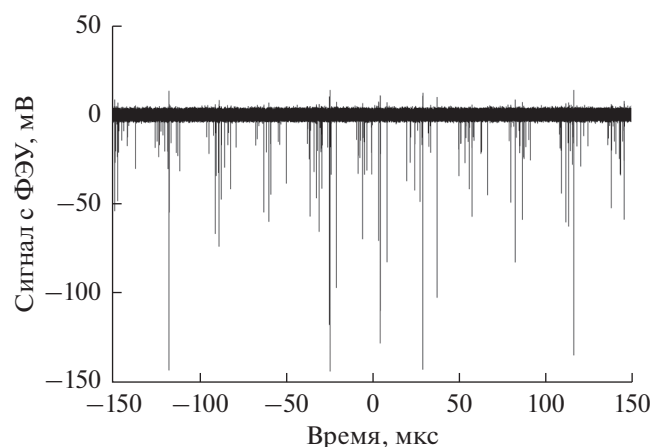


Рис. 12. Оциллограмма сигналов с ФЭУ при наблюдении МПСЛ. Напряжение на резонаторе 95 В.

коллапсирующих пузырьков растет с ростом электрического напряжения на резонаторе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведены результаты наблюдения однопузырьковой и многопузырьковой сонолюминесценции в цилиндрическом резонаторе из пьезокерамики. Показано, что в таком резона-

торе при сравнительно низких электрических напряжениях порядка нескольких десятков вольт создаются условия для возникновения сонолюминесценции. Наблюдение ОПСЛ проводилось на основной радиальной моде резонатора на частоте около 19 кГц. Численное моделирование акустического поля в резонаторе показало, что основная мода представляет собой изгибные колебания цилиндрической пьезокерамической стенки, при которой формируется максимум поля давления примерно в середине водного слоя. Синхронные измерения акустического поля в резонаторе и оптических импульсов проводилось как для ОПСЛ, так и для МПСЛ. МПСЛ наблюдалась при превышении порога кавитации при напряжении около 80 В. Таким образом, результаты работы показывают, что использование пьезокерамических резонаторов дает возможность сравнительно просто получить условия для возникновения и исследования сонолюминесценции, в особенности одиночного пузырька.

Работа частично выполнена в рамках госзадания ИФФ РАН 0035-2019-0009 (ИНД) и 0035-2019-0011 (ВВЧ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brenner V.P., Hilgenfeld S., Lohse D. Single-bubble sonoluminescence // *Rev. Mod. Phys.* 2002. V. 74. № 2. P. 425–484.
2. Lauterborn W., Kurz T. Physics of bubble oscillation // *Rep. Prog. Phys.* 2010. V. 73. P. 106501.
3. Борисенко В.А. Сонолюминесценция: эксперименты и модели (обзор) // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 3. С. 333–360.
4. Shapira D., Saltmarsh M. Nuclear fusion in collapsing bubbles – is there? An attempt to repeat the observation of nuclear emissions from sonoluminescence // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. № 10. P. 10302.
5. Физические величины. Справочник. Под редакцией Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Moran M., Sweider G. Measurements of sonoluminescence temporal pulse shape // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 80. № 22. P. 4987–4990.
7. Максимов А.О., Половинка Ю.А. Акустические проявления газового включения, расположенного вблизи межфазной границы // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 1. С. 22–32.