

УДК: 534-14  
OECD: 2.3.6

## Экспериментальное исследование влияния газовых пузырей на уровень звукового давления в жидкости, собственные частоты которых близки к частотам звуковых колебаний

Зарипов Ф.А.<sup>1\*</sup>, Павлов Г.И.<sup>2</sup>, Горбунова О.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Аспирант кафедры Специальных технологий в образовании,

<sup>2</sup> Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Специальных технологий в образовании,

<sup>3</sup> К.т.н., доцент кафедры Промышленной и экологической безопасности,

<sup>1,2,3</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, РФ

### Аннотация

В гидравлических системах часто можно встретить газопузырьковые жидкости, которые образуются в результате подсоса воздуха из окружающей среды и его смешения с жидкой фазой. Самопроизвольное попадание воздуха в жидкую среду оказывает негативное воздействие на конструктивные элементы технических систем, а также на работу самой системы. В некоторых случаях газовые пузырьки могут вызвать положительный эффект, например, уменьшать уровень звуковых колебаний в жидкостях. В данной статье приведены результаты экспериментов по определению дисперсных характеристик керамического распылителя воздуха в водную среду, расчётов собственных частот газовых пузырей и на основе полученных результатов объяснена причина неравномерности затухания амплитуды звукового давления на разных обертонах.

**Ключевые слова:** подавление резонансных колебаний в жидкостных трактах, пузырьки газа, диссипация звуковой энергии, колебания среды, стоячая волна в жидкостях.

## *Experimental study of the effect of gas bubbles on the level of sound pressure in a liquid, the natural frequencies of which are close to the frequencies of sound vibrations*

Zaripov A.F.<sup>1\*</sup>, Pavlov G.I.<sup>2</sup>, Gorbunova O.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate student, Department of Special Technologies in Education,

<sup>2</sup> DSc, Professor, Department of Special Technologies in Education,

<sup>3</sup> PhD, Associate Professor, Department of industrial and environmental safety,

<sup>1,2,3</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

### Abstract

In hydraulic systems, it is often possible to find gas bubbling liquids, which are formed as a result of the suction of air from the environment and its mixing with the liquid phase. Spontaneous ingress of air into the liquid medium has a negative impact on the structural elements of the technical systems, as well as on the operation of the system itself. In some cases, gas bubbles can cause a positive effect, such as reducing the level of sound vibrations in liquids. This article presents the results of experiments to determine the dispersed characteristics of a ceramic air sprayer into an aqueous medium, calculate the natural frequencies of gas bubbles,

---

\*E-mail: zaripovfa@mail.ru (Зарипов Ф.А.)

and based on the results obtained, the reason for the uneven attenuation of the amplitude of sound pressure on different overtones is explained.

**Keywords:** suppression of resonant oscillations in liquid paths, gas bubbles, sound energy dissipation, medium vibrations, standing wave in liquids.

## Введение

В гидравлических системах часто можно встретить газопузырьковые жидкости, которые образуются в результате подсоса воздуха из окружающей среды и его смешения с жидкой фазой. Самопроизвольное попадание воздуха в жидкую среду оказывает негативное воздействие на конструктивные элементы технических систем, а также на работу самой системы [1-10]. В некоторых случаях, газовые пузырьки могут вызвать положительный эффект, например, уменьшить уровень звуковых колебаний в жидкостях [11]. Благодаря этому эффекту можно подавить стоячие волны, пагубно влияющие на расчётные параметры многих технических устройств. Газовые пузыри в жидкостях ведут себя достаточно устойчиво и в большинстве случаев являются полидисперсными. Собственные частоты колебаний газовых пузырьков зависят от их диаметра. При некоторых соотношениях этих частот с частотами звуковых колебаний, распространяющихся в жидкости, должно наблюдаться взаимное их влияние. Применительно к ультразвуковым колебаниям в газопузырьковых жидкостях такие исследования проводились многими авторами [12-14]. В диапазоне низкочастотных колебаний работ по исследованию взаимного влияния собственных частот колебаний пузырей и звуковых частот мало.

Изучению процессов взаимодействия пузырьков газа с звуковыми волнами, где их носителем является жидкость, посвящены работы [4, 12-19]. Однако, из имеющихся данных не представляется возможным построение целостной картины взаимного влияния газовых пузырей и волны звукового давления, когда собственные частоты газовых пузырей близки к частотам звуковых колебаний. Она крайне важна при решении практических задач, в частности, когда необходимо нивелировать влияние стоячей волны на работу жидкостных расходомеров.

Целью данной работы явилось экспериментальное подтверждение зависимости уровней звукового давления в жидкости от размеров газовых пузырей.

## 1. Описание экспериментального стенда и порядок проведения исследований

Экспериментальный стенд состоит из объекта исследования, измерительных систем и устройства генерации колебаний. На рисунке 1 представлен объект исследования - цилиндрическая труба (5) длиной 1,5 м, прикрепленная к стойке (6). Труба заполнена водой. В нижний конец трубы (5) вмонтирован поршень с резиновой мембраной (4), соединенный при помощи штока с вибростолом (7) вибрационной установки. Электрический сигнал, подаваемый на вибрационную установку, формировался генератором электрических сигналов (1). Регистрация параметров колебаний в жидкости осуществлялась акустическим датчиком (9), положение которого в трубе относительно верхнего среза трубы изменяемо. Сигнал с датчика передавался на измерительный комплекс «Экофизика» (2), подключенный к ЭВМ. Газ в трубу подводился из баллона со сжатым газом, расход которого регулировался редуктором [20].



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

1 – генератор электрических сигналов, 2 – измерительный комплекс «Экофизика» с пьезодатчиком, 3 – термоанемометр, 4 – поршень механического генератора колебаний с резиновой мембраной, 5 – цилиндрическая труба, 6 – стойка, 7 – вибростол вибрационной установки

Пузырьки генерировались пористым керамическим наконечником, расположенным в нижней части трубы (5) вблизи поршня (4). Расход подаваемого газа измерялся термоанемометром (3) с цифровой индикацией [20].

Принцип работы стенда заключался в следующем. Труба (5) заполнялась водой. На баллоне со сжатым газом открывался кран. Включался измеритель расхода газа (3). Редуктором устанавливался необходимый объемный расход газа (по скорости газа). В случае необходимости лишняя жидкость из трубы сливалась. Газ через керамический наконечник в виде пузырьков поступал в жидкость, которые под действием сил Архимеда поднимались вверх. В трубе формировалась двухфазная среда – «жидкость + газы». Содержание газов в трубе (5) определялось объемным методом. После включения генератора электрических сигналов (1) в соответствии с заданным сигналом, вибростол (7) передавал на поршень (4) механические колебания. Колеблющийся поршень (4) генерировал в жидкости возмущения давления пропорциональные электрическому сигналу. Вибрационная установка с генератором электрических сигналов позволяет формировать в жидкости звуковые колебания различной частоты и амплитуды. Путем подбора частоты колебаний поршня в трубе (5) можно вызвать резонансные колебания [20].

## 2. Результаты исследований и их анализ

Исследования влияния размера газового пузыря на уровень звукового давления в пучности стоячей волны, образующейся в трубе с водой, проводились на аргоне. В ходе экспериментов объемный расход газа не менялся и составлял  $V = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Анализировались уровни звукового давления на тех частотах,

которые для экспериментальной трубы являлись резонансными: 260 Гц, 770 Гц, 1250 Гц. В экспериментах длина трубы оставалась постоянной и равнялась 1,5 м. Результаты экспериментальных исследований в табличной форме приведены ниже.

Таблица 1

Разность уровней звукового давления на резонансных частотах до и после подачи газов

Вид газа	Разность уровней звукового давления на резонансных частотах, дБ		
	260 Гц	770 Гц	1250 Гц
Аргон	33	42	34

Из таблицы видно, что снижение уровня звукового давления сильно зависит от резонансной частоты - наибольшая диссипация энергии волны происходит на обертоном 770 Гц. Для выяснения причин выявленной закономерности проводились исследования содержания аргона в газожидкостной смеси при неподвижном положении поршня и при его колебаниях на частотах равных резонансным. Далее рассчитывались плотности смесей. Расход подаваемых газов на входе в керамический наконечник поддерживался один и тот же  $V = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Соотношение  $V_{\text{Г}}/V_{\text{Ж}}$  определялось объемным методом. Неопределенность результатов измерений составляла не более 3%. Результаты исследований в табличной форме приведены ниже.

Таблица 2

Плотность смесей газа и жидкости в зависимости от частоты колебания поршня

Вид газа	Плотность смеси газа и жидкости, кг/м <sup>3</sup>			
	0 Гц	260 Гц	770 Гц	1250 Гц
Аргон	948,1	952,1	953,1	954,1

Из данных таблицы хорошо видно, что при распространении в жидкости звуковой волны плотность газопузырьковой жидкости несколько возрастает, но она не зависит от значения частот. Из технической акустики известно, что плотность и скорость звука среды значительно влияют на уровень звукового давления, откуда следует, что уменьшение значения уровня звукового давления на частоте 770 Гц не связано с плотностью.

Если сопоставить данные таблицы, то можно прийти к следующим выводам и рассуждениям:

1. При колебаниях плотность смеси газа и жидкости несколько возрастает по сравнению с плотностью смеси в отсутствие колебаний.

2. Стоячие волны достаточно эффективно гасятся подачей в трубу газов в пучность давления, расположенной вблизи поршня.

3. Зависимость разности уровней звукового давления от резонансных частот значительна. Наибольшая диссипация звуковой энергии происходит на первом обертоном,  $f=770$  Гц. Это можно объяснить следующим. Газовые пузырьки в исследуемой трубе создаются керамическим наконечником, имеющим поры разных диаметров. От размеров пор зависит диаметр пузырьков. Пузырьки имеют собственные частоты колебаний, которые в принятых условиях проведения экспериментов главным образом зависят от их радиуса. На частотах звуковой волны близких или кратных к собственной частоте пузырьков они начинают совершать резонансные колебания. Рассеивающая способность резонансных пузырьков хорошо известна [19, 21]. Наличие даже

небольшого числа пузырьков на пути распространения звуковых волн в воде приводит к значительному рассеиванию звука. Вышесказанное подтверждено экспериментами. Для определения спектра размеров пузырьков, формируемых керамическим распылителем, изготавливалась труба прямоугольного сечения. Передняя и задняя стенки трубы были изготовлены из стекла. Картина распределения пузырьков газа в воде, генерируемых керамическим наконечником, регистрировалась фотосъемкой. Для примера, на рисунке 2 приведена фотография смеси газа и воды.

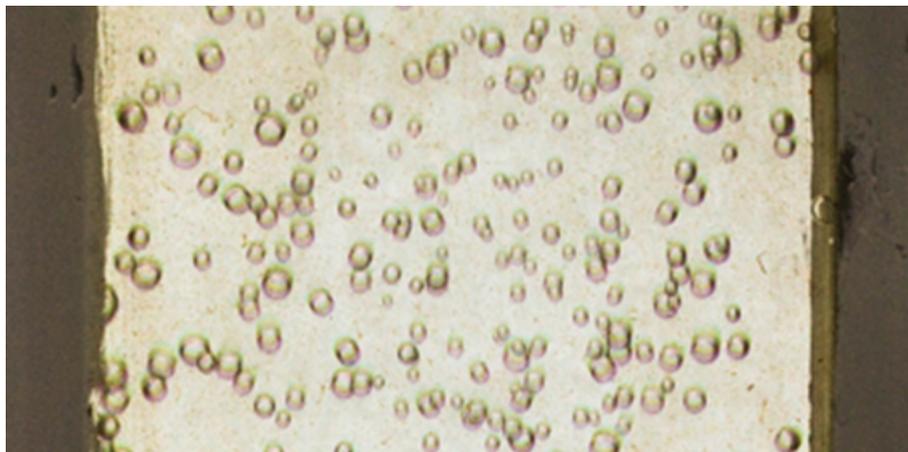


Рис. 2. Фотография смеси газа и жидкости  
Объемный расход газа  $V = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Спектр распределения пузырьков по размерам определялся путем обработки полученных фотоснимков на ПЭВМ с использованием индустриальной программы «SIAM-600 General Description». На рисунке 3 приведен спектр размеров пузырьков, формируемых керамическим распылителем.

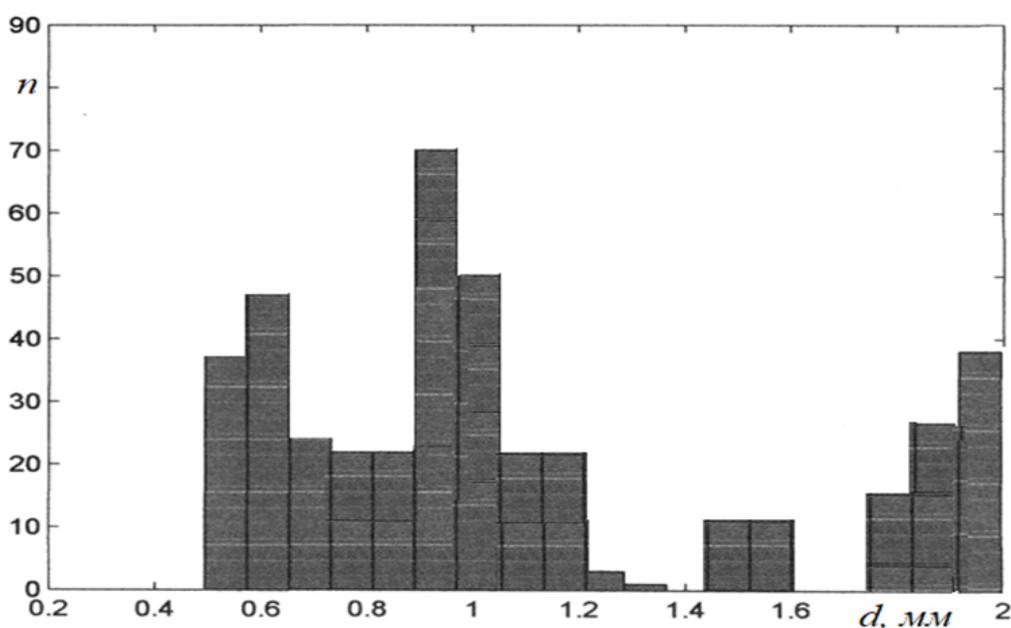


Рис. 3. Спектр размеров пузырьков аргона в воде  
(n – количество пузырей определенного диаметра в единице площади,  
d – диаметр пузырей)

Из рисунка видно, что распылитель генерирует полидисперсные газовые пузырьки. Тогда рассеяние звука на данной частоте практически полностью будет определяться пузырьками «резонансного размера», то есть с пузырьками радиуса  $r$ . Для воздушного пузырька вблизи свободной поверхности воды радиус вычисляется согласно [19]:

$$kr = \sqrt{\frac{3\beta_{\text{воды}}}{\beta_{\text{газа}}}} = 0,014, \quad (1)$$

где  $\beta_{\text{воды}}$  – коэффициент сжимаемости воды,  $\beta_{\text{газа}}$  – коэффициент сжимаемости воздуха.

Преобразуя формулу, учитывая, что  $k = \omega/c$ ,  $\omega = 2\pi f$ , ( $c$  – скорость звука в газопузырьковой жидкости, определена экспериментально,  $c=310$  м/с,  $f$  – частота вынуждающей волны, Гц), получили

$$r = \frac{691}{f}, \text{ мм} \quad (2)$$

Для исследованной акустической системы частотами вынуждающей силы выбраны резонансные: 260 Гц, 750 Гц, 1250 Гц. Тогда диаметры пузырьков «резонансного размера» будут следующие: 5 мм, 1,8 мм, 1,3 мм. В спектре размеров пузырьков, определенном экспериментально, пузырьки с вычисленными диаметрами имеются. Это свидетельствует о том, что в рассмотренной системе резонансные колебания пузырьков способствуют возрастанию потерь акустической (механической) энергии. Сопоставляя данные таблицы 1 и рисунка 3, можно заметить, что эффективность рассеяния звуковой энергии на той или иной частоте зависит от количества пузырьков «резонансного размера».

### Заключение

Приведенные в работе экспериментальные данные позволяют прийти к важному практическому выводу о возможности снижения уровня звукового давления на выбранной резонансной частоте путем подачи в жидкость калиброванных газовых пузырей. Если обеспечить подачу пузырьков газа с размерами, собственные частоты которых близки или кратны частоте падающих на них звуковых волн, то диссипация энергии таких волн максимальна.

### Список литературы

1. А.Б. Роскин, Устройства для стабилизации колебаний давления и расхода в тепловых сетях. Новости теплоснабжения, № 02, 2004 г, с. 23-31
2. С.А. Андреева. Инновационные методы диагностики тепловых сетей. Новости теплоснабжения, № 4 (200), 2017 г., с.22-38.
3. В.М. Молочников, О.А. Душина, А.А. Паерелий, С.А. Колчин. Переход к турбулентности в канале при отрыве потока за поперечными выступами// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.- Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. № 4. с. 31-34.
4. Л.И. Чернявский. Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин: повышение надежности и точности систем с проточными гидросилителями. / Л. И. Чернявский. - СПб.: Энерготех, 2003. - 183 с. ISBN 5933640042

5. Svete, A., Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsic, I. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters // *Journal of Sound and Vibration*. 2015. Т.352. С. 30-45. OI:10.1016/j.jsv.2015.05.014.
6. Юрманов, В.А., Гудков К.В. Анализ некоторых погрешностей кориолисовых расходомеров // *Современные информационные технологии*. 2006. № 4. С. 48-50.
7. Cheesewright R., Clark C. The effect of flow pulsations on Coriolis mass flow meters // *J. Fluids Struct.* – 1998. Т.12. – С.1025-1039. DOI:10.1006/jfls.1998.0176.
8. Belhadj A., Cheesewright R., Clark C. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose fcode // *J. Fluids Struct.* 2000. Т.14. С. 613-634. DOI:10.1006/jfls.2000.0287.
9. Vikram A. Kolhe, Ravindra L. Edlabadkar. Performance evaluation of Coriolis mass flow meter in laminar flow regime // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2021. Т.77. – 101837. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2020.101837.
10. Haussmann, M., Claro Berreta, A., Lipeme Kouyi, G., Riviere, N., Nirschl, H., Krause, M. J. Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a lattice Boltzmann method – Application to Coriolis mass flowmeter // *Comput. Math. Appl.* 2019. Т.78. №10. С. 3285-3302. DOI:10.1016/j.camwa.2019.04.033.
11. Р.А Сунчари, Машков М.А., Матросов А.В. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих системах. *Динамика и виброакустика*. Т.4, № 3, 2018 г., с.16-25.
12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1987.
13. Д. А. Губайдуллин, Р. Н. Гафиятов. Акустические волны в вязкоупругих пузырьковых средах // *Теплофизика высоких температур*, 2019, том 57, № 1, с. 150–153.
14. Д. А. Губайдуллин, Р. Н. Гафиятов. Отражение и прохождение акустической волны через многофракционный пузырьковый слой // *Теплофизика высоких температур*, 2020, том 58, № 1, с. 97–100.
15. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: ИТФ, 1983. 238 с.
16. Temkin S. *Suspension Acoustics: An Introduction to the Physics of Suspensions*. N.Y.: Cambridge University Press, 2005.
17. Шагапов В.Ш., Сарапулова В.В. Особенности преломления и отражения звука на границе пузырьковой жидкости // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 1. С. 40.
18. Avdeev A.A. *Bubble Systems*. Switzerland: Springer Int.Publ., 2016.
19. Общая акустика. М. А. Исакович. Учебное пособие. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1973 г.
20. Зарипов Ф.А. Экспериментальное исследование влияния различных газов на уровень звукового давления в стоячей волне в жидкости до и после подачи газа / Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Кочергин А.В. // *Сборник докладов Всероссийской конференции XXXVIII «Сибирский теплофизический семинар» - Новосибирск, 2022.* С.90. ISBN 978-5-89017-077-4
21. В.С. Федотовский, Т.Н. Верещагина. Низкочастотная резонансная дисперсия звука в пузырьковых средах // *Теплофизика и аэромеханика*, 2007, том 14, № 3, с. 445 - 448.

## References

1. A.B. Roskin, *Ustrojstva dlya stabilizacii kolebanij davleniya i raskhoda v teplovyh setyah*. *Novosti teplosnabzheniya*, № 02, 2004 g, s. 23-31

2. S.A. Andreeva. Innovacionnye metody diagnostiki teplovyh setej. Novosti teplosnabzheniya, № 4 (200), 2017 g., s.22-38.
3. V.M.Molochnikov, O.A.Dushina, A.A.Paerelij, S.A. Kolchin. Perekhod k turbulentnosti v kanale pri otryve potoka za poperechnymi vystupami // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo.- N.Novgorod: Izd-vo NNGU im. N.I.Lobachevskogo, 2011. № 4. s. 31-34.
4. L.I. CHernyavskij. Avtomaticheskoe regulirovanie parovyh i gazovyh turbin: povyshenie nadezhnosti i tochnosti sistem s protochnymi gidrousilitelyami. / L. I. CHernyavskij. - SPb.: Energotekh, 2003. - 183 s. ISBN 5933640042
5. Svete, A., Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsic, I. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters // Journal of Sound and Vibration. 2015. T.352. C. 30-45. OI:10.1016/j.jsv.2015.05.014.
6. YUrmanov, V.A., Gudkov K.V. Analiz nekotoryh pogreshnostej koriolisovyh raskhodomerov // Sovremennye informacionnye tekhnologii. 2006. № 4. S. 48-50.
7. Cheesewright R., Clark C. The effect of flow pulsations on Coriolis mass flow meters // J. Fluids Struct. – 1998. T.12. – C.1025-1039. DOI:10.1006/jfs.1998.0176.
8. Belhadj A., Cheesewright R., Clark C. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose fcode // J. Fluids Struct. 2000. T.14. C. 613-634.DOI:10.1006/jfs.2000.0287.
9. Vikram A. Kolhe, Ravindra L. Edlabadkar. Performance evaluation of Coriolis mass flow meter in laminar flow regime // Flow Measurement and Instrumentation. 2021. T.77. – 101837. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2020.101837.
10. Haussmann, M., Claro Berreta, A., Lipeme Kouyi, G., Riviere, N., Nirschl, H., Krause, M. J. Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a lattice Boltzmann method – Application to Coriolis mass flowmeter // Comput. Math. Appl. 2019. T.78. №10. C. 3285-3302. DOI:10.1016/j.camwa.2019.04.033.
11. R.A Sunchari., Mashkov M.A., Matrosov A.V. Neustojchivost' i avtokolebaniya v gidravlicheskih sledyashchih sistemah. Dinamika i vibroakustika. T.4, № 3, 2018 g., s.16-25.
12. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred.CH. 1, 2. M.: Nauka, 1987.
13. D. A. Gubajdullin, R. N. Gafiyatov. Akusticheskie volny v vyazkouprugih puzyr'kovykh sredah //Teplofizika vysokih temperatur, 2019, tom 57, № 1, s. 150–153
14. D. A. Gubajdullin, R. N. Gafiyatov. Otrazhenie i prohozhdenie akusticheskoy volny cherez mnogofrakcionnyj puzyr'kovyj sloj //Teplofizika vysokih temperatur, 2020, tom 58, № 1, s. 97–100.
15. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., SHrejber I.R. Rasprostranenie voln v gazo- i parozhidkostnykh sredah. Novosibirsk: ITF, 1983. 238 s.
16. Temkin S. Suspension Acoustics: An Introduction to the Physics of Suspensions. N.Y.: Cambridge University Press, 2005. 398 p.
17. SHagapov V.SH., Sarapulova V.V. Osobennosti prelomleniya i otrazheniya zvuka na granice puzyr'kovoij zhidkosti // Akust. zhurn. 2015. T. 61. № 1. S. 40
18. Avdeev A.A. Bubble Systems. Switzerland: Springer Int.Publ., 2016
19. Avdeev Obschaya akustika. M. A. Isakovich. Uchebnoe posobie. Izdatel'stvo «Nauka», Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, M., 1973 g.
20. Zaripov F.A. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya razlichnyh gazov na uroven' zvukovogo davleniya v stoyachej volne v zhidkosti do i posle podachi gaza / Zaripov F.A., Pavlov G.I., Kochergin A.V.// Sbornik dokladov Vserossijskoj konferencii XXXVIII «Sibirskij teplofizicheskij seminar» - Novosibirsk, 2022. S.90. ISBN 978-5-89017-077-4
21. V.S.Fedotovskij, T.N. Vereshchagina. Nizkochastotnaya rezonansnaya dispersiya zvuka v puzyr'kovykh sredah //Teplofizika i aeromekhanika, 2007, tom 14, № 3, s. 445 - 448.