

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.^{1*}, Павлов Г.И.², Горбунова О.А.³

¹ Аспирант кафедры Специальных технологий в образовании,

² Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Специальных технологий в образовании,

³ К.т.н., доцент кафедры Промышленной и экологической безопасности,

^{1,2,3} 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.^{1*}, Pavlov G.I.², Gorbunova O.A.³

¹ Graduate student, Department of Special Technologies in Education,

² DSc, Professor, Department of Special Technologies in Education,

³ PhD, Associate Professor, Department of industrial and environmental safety,

^{1,2,3} 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 ³ | | | |
|----------|--|--------|--------|---------|
| | 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.

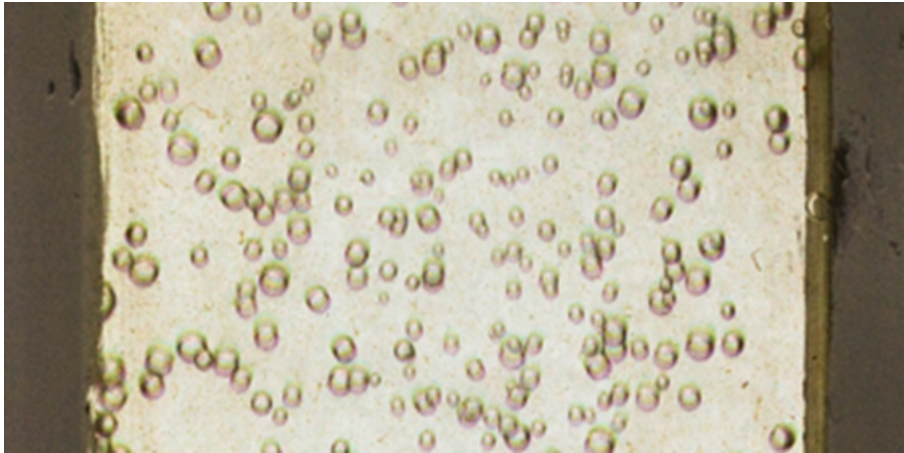


Рис. 2. Фотография смеси газа и жидкости
Объемный расход газа $V = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

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.

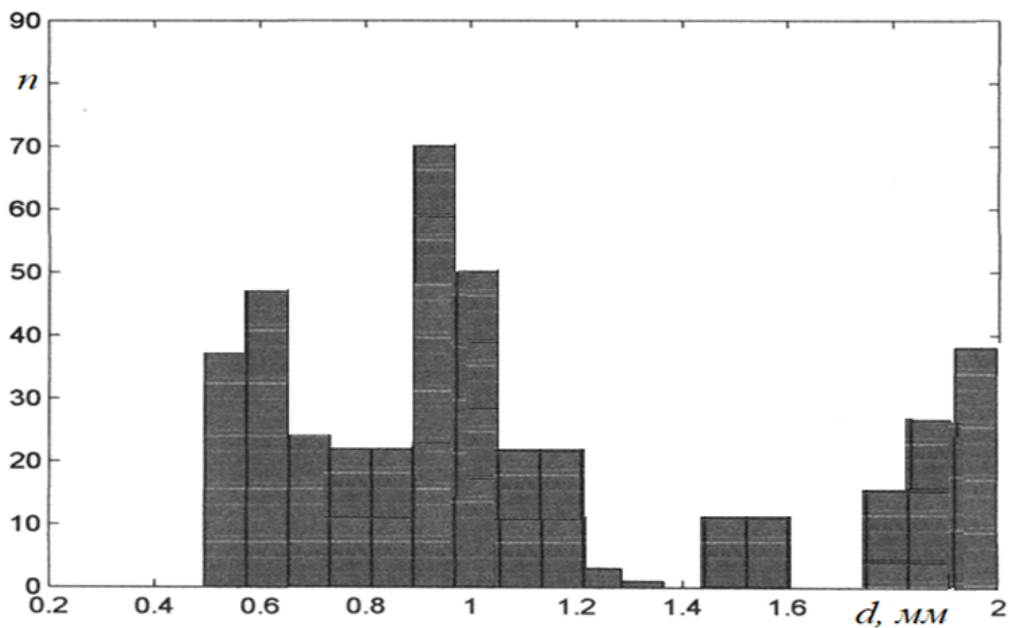


Рис. 3. Спектр размеров пузырьков аргона в воде
(n – количество пузырей определенного диаметра в единице площади,
 d – диаметр пузырей)

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 гидроусилителями. / 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/jffs.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/jffs.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 vyzkouprugih 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'kovojszhidkosti // Akust. zhurn. 2015. T. 61. № 1. S. 40
18. Avdeev A.A. Bubble Systems. Switzerland: Springer Int.Publ., 2016
19. Avdeev Obschchaya 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 stoyachejszhidkosti do i posle podachi gaza / Zaripov F.A., Pavlov G.I., Kochergin A.V. // Sbornik dokladov Vserossijskojs 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.