

СОУДАРЕНИЕ КАПЛИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ: АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ТОЛЩЕ ЖИДКОСТИ

Прохоров В.Е.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526, Москва,
просп. Вернадского, 101/1, e-mail: prohorov@ipmnet.ru*

Статья поступила в редакцию 29.05.2019, одобрена к печати 23.07.2019

Экспериментальное исследование излучения звука каплями, падающими в невозмущенную жидкость, выполнено с помощью широкополосных гидрофонов и высокоскоростной видеокамеры. Столкновение капли с водной поверхностью сопровождается вовлечением воздуха и формированием подводных газовых полостей, что приводит к появлению поверхностных сил и порождаемых ими быстрых течений, генерирующих в моменты отрыва полостей экстремальные ускорения порядка 10^5 м/с^2 , что оказывается достаточным для резонансного акустического возбуждения полостей и излучения звуковых пакетов. Последовательность излучаемых сигналов содержит ударный импульс, а также один или несколько звуковых пакетов, генерируемых резонансными пузырями, отрывающимися от подводных каверн. Число резонирующих пузырей меняется от опыта к опыту в зависимости от сценария соударения и дальнейшего поведения, включающего, в том числе, процесс дробления первичных полостей. Размеры пузырей, измеренные по видеокадрам, соответствуют расчетным значениям в соответствии с резонансной частотой Миннаэрта.

Ключевые слова: капля, водная поверхность, столкновение, сверхзвуковое расширение, ударный импульс, резонансное излучение, гидрофон, скоростная видеосъемка

Звуковое излучение, генерируемое при ударе каплями атмосферных осадков о морскую поверхность, – значимая компонента в общем бюджете подводного шума океана, занимающая частотный диапазон от сотен герц до десятков килогерц; продолжительность данного вида шума – от секунд до десятков часов (Бардышев, 2010; Nystuen, 1986). Кроме того, это ключевое свойство при неконтактном измерении параметров падающих дождевых капель, оценке интенсивности осадков (Nystuen, 1986; Mani, Pillai, 2004). Однако к настоящему времени не создано теоретической модели излучения, обеспечивающей точность, пригодную для практических целей – известные представления являются чисто эмпирическими и базируются на данных физического моделирования (Nystuen, 2001; Bjorno, 1994; Pumphrey et al., 1989; Prosperetti et al., 1989; Franz, 1959; Minnaert, 1933). В этой связи по-прежнему высока востребованность данных лабораторных экспериментов по акустике падающих капель.

Настоящая работа посвящена экспериментам по резонансному акустическому излучению, возникающему на стадии отрыва воздушных полостей от подводных каверн.

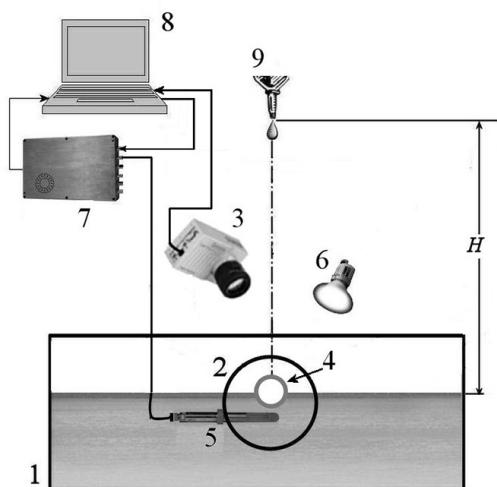


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.
 1 – бассейн с оптическими вставками 2,
 3 – видеокамера, 4 – объектив видеокамеры,
 5 – гидрофон, 6 – прожектор, 7 – интерфейс
 сбора/передачи данных, 8 – ПК,
 9 – капельный дозатор.

Опыты выполнены по схеме на рис. 1. Бассейн 1 размерами $145 \times 50 \times 60$ см с иллюминаторами из оптического стекла 2 заполнялся дегазированной водопроводной водой. Скорость звука принималась равной $c = 1500$ м/с. Глубина воды в бассейне составляла 40 см, что существенно превышало все характерные масштабы гидродинамических процессов. Видеокамера 3 (Optronis CR3000x2) располагалась так, что поле зрения объектива 4 делилось примерно пополам линией раздела «воздух–вода». Гидрофон 5 (ГИ-54, полоса частот 0.002–100 кГц, неравномерность 3 дБ) помещался на фиксированной глубине h от водной поверхности. Область соударения подсвечивалась прожектором 6. Данные первичных акустических измерений поступали на интерфейс 7, где формировались в пакеты для передачи в компьютер 8. Капли создавались дозатором 9, сопло которого расположено на высоте H от водной поверхности. Диаметр сферической капли равнялся $D = 5$ мм. Скорость капли U при подлете к поверхности измерялась по нескольким видеокадрам.

Начальные стадии соударения (до 100 мс) показаны на рис. 2. В данном эксперименте капля падала с высоты 1 м, скорость приводнения составляла 4.4 м/с. Гидрофон располагался на глубине 3 см. В момент контакта ($t = 0$) возникает ударный импульс I (рис. 3). Его происхождение – сверхзвуковое расширение контура между каплей и свободной поверхностью

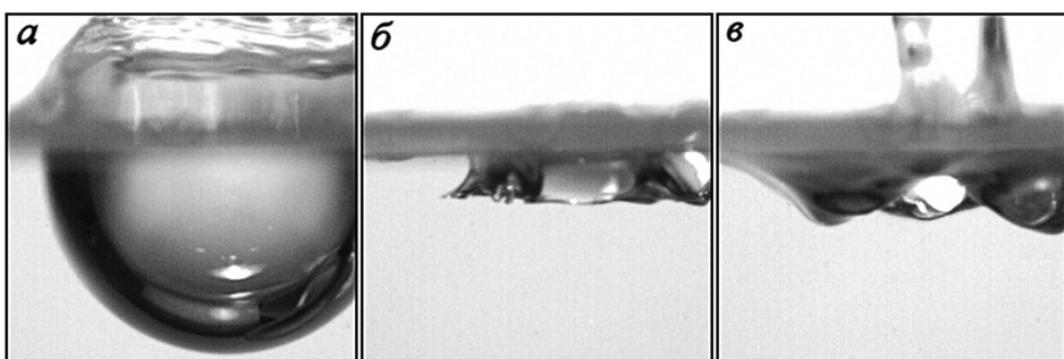


Рис. 2. Стадии эволюции полусферической каверны: *а*–*в* – $t = 24.8, 57.7, 74.7$ мс,
 $H = 100$ см, $D = 5$ мм, $h = 3$ см.

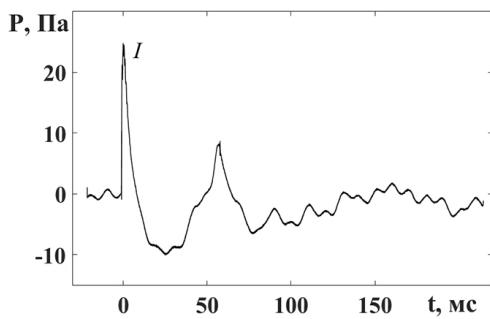


Рис. 3. Ударный импульс I и флуктуации гидродинамического давления при столкновении капли с поверхностью.
 $H = 100$ см, $D = 5$ мм, $h = 3$ см.

(Guo, Williams, 1991; Howe, Hagen, 2011). Ударный импульс – устойчивый элемент акустики соударения, проявляющийся даже на весьма малых скоростях капли ($M = U/c \ll 1$), при условии, что она превышает пороговое значение, определяемое поверхностным натяжением (Прохоров, 2018).

Непосредственно после удара образуется подводная каверна в форме правильной полусферы, которая расширяется до максимального радиуса (рис. 2а). При этом уровень гидростатического давления понижается до минимума – примерно на 10 Па ниже равновесного (рис. 3, $t = 24.8$ мс). Далее под действием поверхностного натяжения каверна движется к свободной поверхности (рис. 2б), давление на гидрофоне возрастает, проходит равновесный (в данном случае нулевой) уровень и достигает максимума при $t = 57.7$ мс. Остаток каверны стягивается к поверхности, часть ее массы переходит в струю, высота которой быстро растет (рис. 2в), затем начинает уменьшаться. На конце струи формируется крупная вторичная капля (Прохоров, Чашечкин, 2011а). На данном временном интервале (75–215 мс) давления слабо осциллирует вблизи нулевого уровня (рис. 3). Далее начинается формирование воздушных пузырей, излучающих низкочастотные акустические пакеты (рис. 4).

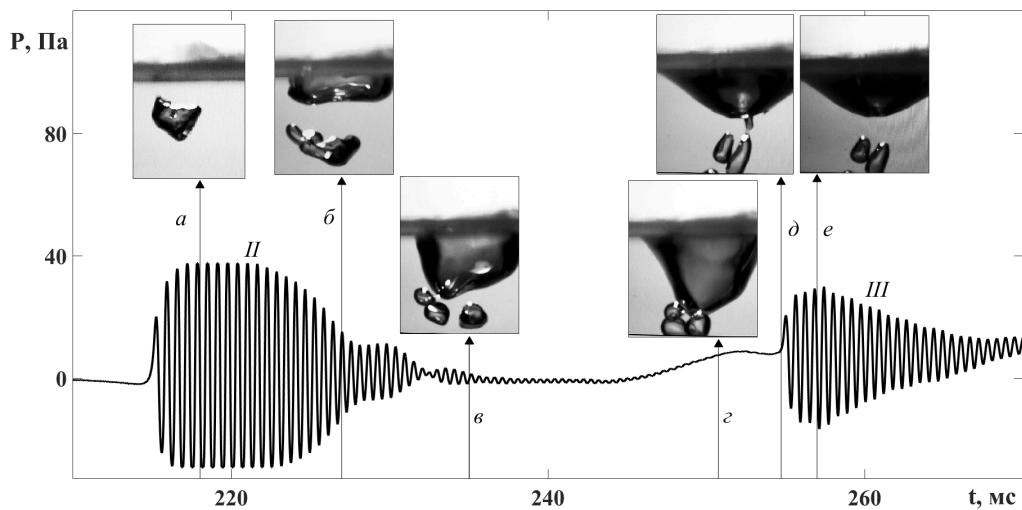


Рис. 4. Выходной сигнал гидрофона и видеокадры газового пузыря в фиксированные моменты времени (отмечены стрелками);
 $a-e - t = 218, 227, 235, 245, 256, 257$ мс. Частота съемки 9000 к/с.
 $H = 100$ см, $D = 5$ мм, $h = 3$ см.

Первый пузырь образуется на последней стадии погружения поверхностной струи – по сути это каверна, которая в последний момент замыкается сверху, принимая угловатую и изрезанную форму (рис. 4), на поверхности – часть погружающейся вторичной капли. Отрыву пузыря сопутствует начало звукового пакета II.

Через 9 мс форма пузыря резко меняется (рис. 4б), при этом в нем образуются отдельные выпуклости. Амплитуда пакта II заметно возрастает. Одновременно формируется новая каверна, быстро приближающаяся к пузырю. Еще через 8 мс пузырь распадается на отдельные фрагменты, при этом амплитуда излучения резко падает (рис. 4в). Нижний край новой каверны вплотную приближается к отделившимся фрагментам и в момент $t = 245$ мс захватывает один из них (крайний правый на рис. 4г) – излучение практически гасится.

Затем каверна начинает возвратное ускоренное движение к поверхности, перемычка между ней и захваченным пузырем растягивается, истончается (рис. 4д) и разрывается (рис. 4е). В момент разрыва длина перемычки резко сокращается, пузырь испытывает ударное воздействие, порождая резонансное излучение – звуковой пакет III, начальный участок которого виден на рис. 4, а полная осциллограмма – на рис. 5. На поздней стадии ($t = 258$ мс) пузырь принимает форму, максимально близкую к сфере, диаметр которой и является резонансным размером D_r . Согласно известному представлению (Minnaert, 1933), частота излучения

$$f_r \approx \sqrt{3\gamma p_0 / \rho} / (\pi D_r),$$

где $\gamma = 1.4$; плотность воды и атмосферное давление будем считать равными, соответственно, $\rho = 1000$ кг/м³ и $p_0 = 10^5$ Па. Для $[D] = \text{см}$ частота выражается в герцах $f = 652/D_r$.

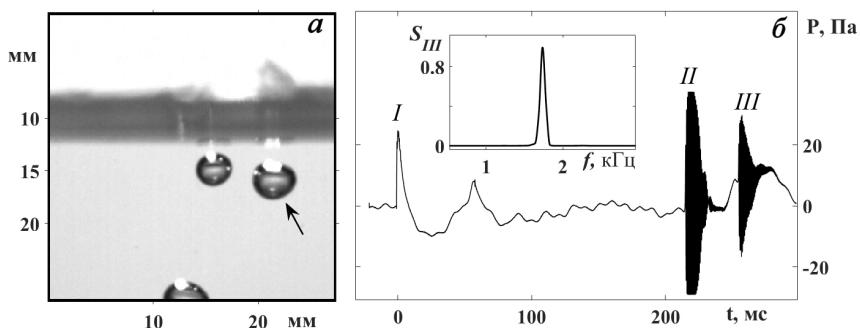


Рис. 5. Картинка воздушных пузырей – а и осциллограмма выхода гидрофона – б на финальной стадии $t = 258$ мс. Вставка – нормированная спектральная плотность пакета III. Стрелкой указан пузырь, излучающий пакет III.

На рис. 5а средний диаметр резонирующего пузыря (показан стрелкой) $D_r = 3.8$ мм, т.е. $f_r = 1.72$ кГц, что почти в точности соответствует частоте спектрального пика на рис. 5б (вставка).

Пакет II, в отличие от моночастотного пакета III, включает три участка: 1, 2 и 3 (рис. 6а), частоты которых, как следует из спектральных кривых (рис. 6б),

заметно различаются. Их значения 1.63, 1.75 и 1.98 соответствуют резонансным диаметрам 4, 3.7 и 3.3 мм. Первый и последний размеры совпадают с диаметром наибольшего (видна его верхняя часть внизу кадра) и наименьшего пузыря (рис. 5 a), средний близок к диаметру повторно оторвавшегося пузыря. Таким образом, отделившаяся в начальной стадии крупная полость (рис. 4 a) уже на момент отрыва состоит из трех слипшихся воздушных пузырей. Этим и объясняется ее последующая фрагментация, начальные признаки которой видны на рис. 4 b . В момент отрыва полости все находящиеся внутри пузыри испытывают ударное

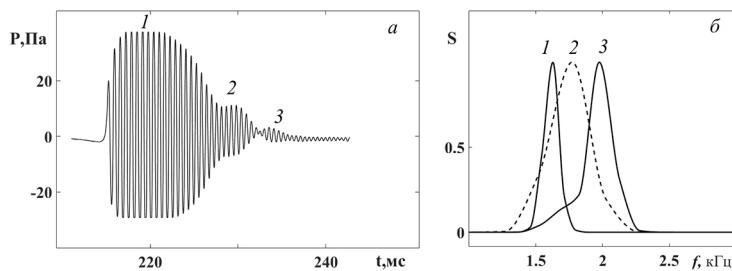


Рис. 6. Разворотка акустического пакета II – a , нормированные спектры участков 1, 2 и 3 – b .

воздействие. По амплитуде и продолжительности излучения (рис. 6 a) можно судить, что максимальному воздействию подвергается самый крупный пузырь, минимальному – самый мелкий.

Количественная оценка ударного воздействия может быть сделана по ускорениям, которые возникают при движении концов разорванных перемычек между каверной и отделяющимися пузырями. Удобнее выбрать ту часть перемычки, которая примыкает к каверне, так как благодаря большим размерам каверны время движения конца перемычки охватывает достаточное число кадров.

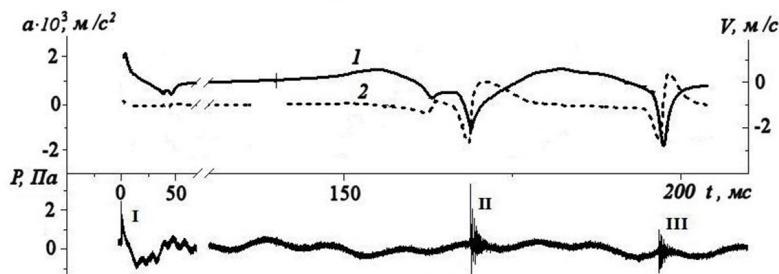


Рис. 7. Вертикальная скорость V – 1, ускорение a – 2 нижней кромки каверны и фонограмма подводного звукового давления P , $H = 50$ см, $h = 3$ см, $U = 2.9$ м/с.

На рис. 7 показаны зависимости скорости и ускорения конца перемычки на единой временной шкале с выходным сигналом гидрофона (Прохоров, Чашечкин, 2011б).

Характер изменчивости в целом гладких кривых резко меняются в окрестности момента удара ($t = 0$) и на двух участках, примыкающих к моментам излучения

резонансных пакетов II и III. При излучении пакетов скорость конца перемычки испытывает скачок около 3 м/с в течение весьма короткого времени, при этом развивается ускорение 2×10^3 м/с² (рис. 7, кривая 2).

Резюмируя изложенный материал, отметим следующее:

Столкновение капли с поверхностью порождает последовательность медленных гидродинамических течений, развивающихся в поле массовых сил. Вовлечение воздуха и формирование газовых полостей приводит к появлению поверхностных сил и порождаемых ими быстрых течений, инициирующих в моменты фрагментации газовых полостей ускорения порядка 10³ м/с, что оказывается достаточным для акустического возбуждения полостей и излучения звуковых пакетов на резонансной частоте. Число излучаемых пакетов – случайный параметр – определяется не только количеством отделившихся полостей, но и числом повторных отрывов.

Вне рамок гидродинамики – сверхзвуковое движение контура контактного пятна между каплей и подстилающей поверхностью. Данный эффект порождает высокочастотное ударное излучение, при условии, что скорость соударения превышает определенное пороговое значение (Прохоров, 2018). Ударное излучение, в отличие от резонансного излучения, характеризуется высокой воспроизводимостью и повторяемостью от опыта к опыту.

В данной работе не рассматривались зависимости амплитуды излучения от размера и скорости (высоты падения) капли. По имеющимся данным (Чашечкин, Прохоров, 2017) увеличение обоих параметров в среднем приводит к росту амплитуд как ударного импульса, так и резонансных пакетов – росту существенно немонотонному, поскольку сценарий погружения капли носит случайный характер.

Эксперименты с одиночными каплями позволяют детально проследить эволюцию подводных процессов, вызванных соударением, и выделить те из них, которые связаны с излучением звука, а также идентифицировать акустические сигналы и измерить их. Однако в природе шум дождя на водной поверхности создается соударением неисчислимого множества капель. В таких условиях возможна только интегральная оценка шума методами математической статистики (Bjorno, 1994; Pumphrey, Crum, Bjorno, 1989).

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310378-8) и частично поддержана грантом РФФИ №18-05-00870.

Литература

- Бардышев В.И. Распределения спектральной плотности подводного шума в шельфовой зоне Тихого океана // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 3. С. 348–351.
- Прохоров В.Е. Влияние молекулярных эффектов на излучение звука при низкоскоростном столкновении капли с поверхностью воды // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. № 4. С. 584–589.
- Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акустический журнал. 2011а. Т. 57. № 6. С. 792–803.

- Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Два режима излучения звука при ударе свободно падающей капли о поверхность воды // ДАН. 2011б. Т. 437. № 1. С. 46–49.
- Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Акустика и гидродинамика удара капли о водную поверхность // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 38–49.
- Bjorno L. Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations // J. De Physique IV. 1994. Colloque C5. Supplement de J. De Physique 3. P. 1023–1030.
- Franz G.J. Splashes as sources of sound in liquids // J. Acoustic. Soc. Am. 1959. Vol. 31. P. 1080–1096.
- Guo Y.P., Williams J.E. A theoretical study on drop impact sound and rain noise // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 227. P. 345–355.
- Howe M.S., Hagen N.A. On the impact noise of a drop falling on water // Journal of sound and vibration. 2011. Vol. 330. P. 625–635.
- Mani T.K., Pillai P.R.S. Drop parameter estimation from underwater noise produced by raindrop impact // Acoustics Research Letters Online. 2004. DOI: 10.1121/1.1759731.
- Minnaert M. On musical air bubbles and the sounds of running water // Philos. Mag. 1933. Vol. 16. P. 235–248.
- Nystuen J.A. Listening to raindrops from underwater: an acoustic disdrometer // J. Acoust. Soc. Am. 2001. Vol. 18. P. 1640–1657.
- Nystuen J.A. Rainfall measurements using underwater ambient noise // J. Acoust. Soc. Am. 1986. Vol. 79. P. 972–982.
- Prosperetti A., Crum L.A., Pumphrey H.C. The underwater noise of rain // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94 (C3). P. 3255–3259.
- Pumphrey H.C., Crum L.A., Bjorno L. Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. Vol. 85. No. 4. P. 518–526

COLLISION OF THE DROPLET WITH THE FREE SURFACE: ACOUSTIC EMISSION IN THE WATER COLUMN

Prokhorov V.E.

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526,

e-mail: prohorov@ipmnet.ru

Submitted 29.05.2019, accepted 23.07.2019

An experimental study of the emission of sound by droplets falling into an unperturbed liquid was performed using wideband hydrophones and a high-speed video camera. Collision of a drop with a water surface is accompanied by air entrainment and the formation of underwater gas cavities, which leads to the appearance of surface forces and fast flows, generating extreme accelerations, which are sufficient for resonant acoustic excitation of cavities and emission of sound packets. The sequence of emitted signals contains a shock pulse, as well as one or more sound packets generated by resonant bubbles detached from underwater cavities. The number of resonating bubbles varies from experience to experience, depending on the collision scenario and further behavior, including, in particular, the process of fragmentation of the primary cavities. The dimensions of the bubbles, measured on video frames, correspond to the values calculated in accordance with the Minnaert resonance frequency.

Keywords: droplet, water surface, collision, supersonic expansion, shock pulse, resonant radiation, hydrophone, high-speed video

References

- Bardyshev V.I. Raspredelenie spectral'noi plotnosti podvodnogo shuma v shel'fovoi zone Tikhogo okeana (Distribution of Spectral Density for Underwater Noise in the Shelf Zone of the Pacific Ocean). *Akusticheskiy zhurnal*, 2010, Vol. 56, No. 3, pp. 348–351.
- Bjorno L. Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations. *J. De Physique IV*, 1994, Colloque C5. Supplement de *J. De Physique* 3, pp. 1023–1030.
- Chashechkin Yu.D. and Prokhorov V.E. Akustika i gidrodinamika udara kapli o vodnyu poverkhost'. *Akusticheskiy zhurnal*, 2017, Vol. 63, No. 1, pp. 38–49.
- Franz G.J. Splashes as sources of sound in liquids. *J. Acoustic.Soc. Am.*, 1959, Vol. 31, pp. 1080–1096.
- Guo Y.P. and Williams J.E. A theoretical study on drop impact sound and rain noise. *J. Fluid Mech.* 1991, Vol. 227, pp. 345–355.
- Howe M.S. and Hagen N.A. On the impact noise of a drop falling on water. *Journal of sound and vibration*, 2011, Vol. 330, pp. 625–635.
- Mani T.K. and Pillai P.R.S. Drop parameter estimation from underwater noise produced by raindrop impact. *Acoustics Research Letters Online*, 2004, doi: 10.1121/1.1759731.
- Minnaert M. On musical air bubbles and the sounds of running water. *Philos. Mag.*, 1933, Vol. 16, pp. 235–248.
- Nystuen J.A. Listening to raindrops from underwater: an acoustic disdrometer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, Vol. 18, pp. 1640–1657.
- Nystuen J.A. Rainfall measurements using underwater ambient noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986, Vol. 79, pp. 972–982.
- Prokhorov V.E. and Chashechkin Yu.D. Generatsiya zvuka pri padenii kapli na poverkhost' zhidkosti (Sound Generation as a Drop Falls on a Water Surface) *Akusticheskiy zhurnal*, 2011a, Vol. 57, No. 6, pp. 792–803.
- Prokhorov V.E. and Chashechkin Yu.D. Dva rezhima izlucheniya zvuka pri udare svobodno padayus'chei kapli o poverkhnost' vody (Two Regimes of Sound Emission Induced by the Impact of a Freely Falling Droplet onto a Water Surface). *Doklady akademii nauk*, 2011b, Vol. 437, No. 1, pp. 46–49.
- Prokhorov V.E. Vliyanie molekularnykh effektov na izluchenie zvuka pri nizkoskorostnom stolknovenii kapli s poverkhnost'yu vody. (Influence of Molecular Effects on the Emission of Sound in a Low-Velocity Impact of a Drop on Water Surface). *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*, 2018, Vol. 153, No. 4, pp. 584–589.
- Prosperetti A., Crum L.A., and Pumphrey H.C. The underwater noise of rain. *J. Geophys. Res.*, 1989, Vol. 94 (C3), pp. 3255–3259.
- Pumphrey H.C., Crum L.A., and Bjorno L. Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1989, Vol. 85, No. 4, pp. 518–526.